

Kölner Beiträge
zur Restaurierung und Konservierung von Kunst- und Kulturgut
Digitale Edition
Band 1

Klebstoffe für die Rissverklebung an Leinengeweben

Lena Reuber

2010
CICS (Institut für Restaurierungs- und Konservierungswissenschaft)
Köln

Kölner Beiträge zur Restaurierung und Konservierung von Kunst- und Kulturgut
Digitale Edition Band 1

2010

Herausgeber:
Fachhochschule Köln
Institut für Restaurierungs- und Konservierungswissenschaft (CICS)
Ubierring 40, D-50678 Köln

Satz / Realisierung des Layouts: H. Portsteffen

Dieser Band basiert auf der Diplomarbeit von Lena Reuber (2008), betreut durch Prof. Dipl. Rest. Hans Portsteffen und
Dipl. Rest. Petra Demuth

© Lena Reuber

Vorwort

Die Technik der Rissverklebung zur Behandlung von Rissen an textilen Bildträgern bedarf trotz aller grundlegender Erfahrungen weiterer nachhaltiger Forschung.

Seit Jahren widmet sich die Studienrichtung Restaurierung und Konservierung von Gemälden, Skulpturen und Moderner Kunst am CICS (Cologne Institut of Conservation Sciences) diesem Forschungszweig intensiv. Wesentliche Schwerpunkte bilden dabei die Klebstoffwahl in Abhängigkeit von der Faserart sowie die Haltbarkeit der Verklebung insbesondere unter wechselnden klimatischen Bedingungen.

Mit der vorliegenden Diplomarbeit präsentiert Lena Reuber die Ergebnisse von Klebstofftests für die Einzelfadenverklebung. Durch den Vergleich der Höchstzugkraft von über 6000 verklebten Leinenfäden sind nunmehr erstmals in dieser Tiefe aussagekräftige und praxisrelevante Daten ermittelt worden. Somit stellt diese Arbeit unseren ersten wichtigen Meilenstein dar.

Namentlich sei an dieser Stelle Lena Reuber, Petra Demuth und Elisabeth Jägers für ihr Engagement und die intensive Zusammenarbeit herzlich gedankt.

Die Publikation enthält die vollständige Diplomarbeit, gekürzt wurden lediglich einige Teile des Anhangs. Mit der gewählten Form des e-books möchte das Institut für Restaurierungs- und Konservierungswissenschaft die Reihe der Kölner Beitrag durch eine weitere Publikationsreihe ergänzen und mit der digitalen Edition die Frequenz der Veröffentlichungen von Restaurierungs- und Forschungsprojekten, die an der Fachhochschule Köln stattfinden, erhöhen.

H.P.

Kurzzusammenfassung

In dieser Arbeit werden Klebstoffe für die Rissverklebung an Leinenfäden getestet. Als Grundlage werden die Eigenschaften von ausgewählten Klebstoffen und von Leinenfäden vorgestellt. Es wurden Zugversuche mit 25 Klebstoffen an insgesamt über 6.000 Fäden durchgeführt. Mit den Klebstoffen Störleim-Weizenstärkekleister, Mowilith D50, Polyamid 5065 und einem Epoxidharz erfolgten weitergehende Versuche. Dabei wurde zusätzlich die Abhängigkeit der Zugbeständigkeit von der verklebenden Person getestet. Außerdem wurden aufgespannte verklebte Leinenfäden wechselnden klimatischen Bedingungen ausgesetzt und deren Zugbeständigkeit in „normalem“, extrem trockenem und extrem feuchtem Klima geprüft. Die Arbeit schließt mit einer Diskussion anhand einer Versuchsreihe zur Übertragbarkeit der Ergebnisse auf Klebungen in Gewebestrukturen. Die Ergebnisse werden durch Diagramme veranschaulicht und geben Hinweise für die Umsetzung bei der Einzelfadenverklebung am textilen Bildträger.

Abstract

In this diploma thesis adhesives for thread-by-thread tear mending of linen yarn are tested. Basic understanding of adhesive and linen characteristics is provided. Tensile tests were carried out with 25 adhesives at altogether over 6,000 threads. Further investigations were carried out with sturgeon glue-wheat starch, Mowilith D50, Polyamid 5065 and an epoxy resin. Additionally the dependency of the adhesive bond on the single user was tested. Moreover stretched pieces of glue joined linen yarn were exposed to changing climatic conditions. Subsequently tensile stiffness and strength in “normal”, extremely dry as well as extremely humid climate was tested. In conclusion the transferability of the results to adhesive bonds in lined canvas was discussed on the basis of a final test run. The results are presented in graphs and are discussed and give precious hints for mending tears in textile painting supports.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	6
2	Aktueller Stand der Rissverklebung	6
	2.1 Begriffsdefinitionen	7
	2.2 Forschungsstand in der Literatur	7
	2.3 Bisher gebräuchliche Klebstoffe	8
3	Leinenfäden	10
4	Klebstoffe	14
	4.1 Theoretische Grundlagen der Fadenverklebung	14
	4.2 Kriterien für die Klebstoffauswahl	17
	4.3 Eigenschaften ausgewählter Materialien	20
	4.3.1 Störleim	21
	4.3.2 Stärkekleister	26
	4.2.3 Junfunori	28
	4.3.4 Aquazol	30
	4.3.5 Celluloseether	33
	4.3.6 Polyvinylacetate	36
	4.3.7 Acrylate	39
	4.3.8 Polyamide	42
	4.3.9 Beva 371	44
	4.3.10 Epoxidharz	44
5	Zugversuche an Einzelfäden	46
	5.1 Versuchsaufbau	47
	5.1.1 Vorbereitung der Prüflinge	47
	5.1.2 Zugprüfung	49
	5.1.3 Klimabelastung	50
	5.2 Zugbelastung der Klebstoffe im Vergleich	52
	5.2.1 Acryldispersionen	55
	5.2.2 Schmelzklebstoffe	58
	5.2.3 Mod. Störleim-Lösungen und deren Einzelkomponenten	61
	5.2.4 Polyvinylacetatdispersionen	65
	5.2.5 Epoxidharz	68
	5.2.6 Vergleich mit den Daten von Heiber	69
	5.3 Zugbelastung im personenbezogenen Versuch	70
	5.3.1 Störleim-Weizenstärkekleister	70
	5.3.2 Mowilith D5	71
	5.3.3 Polyamid	72
	5.3.4 Epoxid	73
	5.3.5 Fazit	74
	5.4 Zugbelastung nach zyklischer Klimabelastung	75
	5.4.1 Störleim-Weizenstärkekleister	75
	5.4.2 Mowilith D50	76
	5.4.3 Polyamid	77
	5.4.4 Epoxid	78
	5.4.5 Fazit	79
	5.5 Zugbelastung bei extremen Klimata	80
	5.5.1 Feuchtes Klima 93% rF	80
	5.5.2 Trockenes Klima 25% r	82
	5.5.3 Zusammenfassung der Ergebnisse	84
6	Übertragbarkeit der Ergebnisse auf Verklebungen in Leinwandstrukturen	85
	6.1 Spannungsverhältnisse in textilen Trägern	85
	6.2 Versuchsaufbau	88
	6.3 Diskussion der Ergebnisse	89
7	Zusammenfassung	92
8	Ausblick	94
9	Verzeichnisse und Anhang	
	9.1 Bibliographie	97
	9.2 Abkürzungsverzeichnis	105
	9.3 Verzeichnis der Abbildungen, Diagramme und Tabellen	107
	9.4 Herstellerverzeichnis	109

1 Einleitung

Die vorhandenen Untersuchungen zu Klebstoffen für die Rissverklebung genügen den heutigen wissenschaftlichen Anforderungen nicht. Daher sollen in dieser Arbeit verschiedene Klebstoffe im Hinblick auf ihre Eignung für die Rissverklebung an Leinengeweben untersucht werden. Dabei wird vor allem folgenden Fragen nachgegangen:

Welche theoretischen Grundlagen der Klebetechnik sind für die Rissverklebung relevant? Wie sind Oberfläche und Adhäsionseigenschaften von Leinenfäden beschaffen? Welche Eigenschaften haben ausgewählte Klebstoffe für die Rissverklebung?

Im praktischen Teil der Arbeit wird als wesentliche Fragestellung geprüft, wie hoch die Zugbeständigkeiten von Klebungen mit verschiedenen Klebstoffen sind. Außerdem werden Versuchsreihen zu folgenden Aspekten durchgeführt:

Wie sehr ist die Belastbarkeit der Klebungen abhängig von den ausführenden Personen? Wie wirken sich häufige Klimawechsel auf die Zugbeständigkeit der Klebungen aus? Und welche Veränderungen treten bei besonders feuchtem beziehungsweise besonders trockenem Klima auf?

Letztendlich soll überlegt werden, welche Spannungen eine Rissverklebung aushalten muss und wie sich die Ergebnisse der Klebungen an einzelnen Fäden auf Verklebungen in Leinengeweben übertragen lassen.

2 Aktueller Stand der Rissverklebung

Risse gehören zu den am häufigsten vorkommenden Schäden am textilen Bildträger. Ursachen können Überspannung, Eigengewicht, Zersetzung der Fasern, Stoßüberdehnungen, Knicke und Schnitte sein.¹

In Geweben können Risse viele verschiedene Erscheinungsformen haben. Heiber nennt unter anderem flexible, dehbare, flauschige, verharzte, hart verkleisterte, wachsgetränkte, brüchige, verkrustete, überlappende, verfilzte, feine, starke, eng beieinanderliegende, gekräuselte, glatte, lang auseinandergefaserte, zu lange, zu kurze, oxidierte und fehlende Fadenenden. Weiterhin können sie in beweglichem oder starrem Gewebeverbund, mit Überschuss an Bildfläche durch Dehnung oder mit klaffenden Rissrändern durch Längszug auftreten. Außerdem werden Risse nach ihrer Rissrichtung (parallel zum Schuss, parallel zur Kette, diagonal abgetreppt, verzweigt, L-, T- oder V-förmig), der Länge des Risses und dem Bildformat unterschieden.² Zudem können Risse in verschiedenen Geweben mit unterschiedlichen Fasermaterialien und Bindungen auftreten.

Die ersten Methoden zur Behandlung von Rissen waren Doublierungen, das Aufkleben rückseitiger Flicker oder das Zuspachteln mit Klebstoff oder Grundierung.³ Eine weitere Methode ist die Schließung mit Faserbrei.⁴ Es ist bekannt, dass diese Maßnahmen auch heute noch in einigen Fällen erwogen werden. Meistens zieht man jedoch das Verkleben der einzelnen Fäden oder das Vernähen des Risses vor. Letzteres ist allerdings nur bei stabilen Geweben möglich, die dem Zug durch die dünnen neuen Fäden widerstehen. Beide Methoden ergeben beinahe unsichtbar geschlossene Risse und sind mit dem Grundsatz des minimalen Eingriffs bisher am besten vereinbar.

¹ HEIBER 1996, S. 120.

² HEIBER 1996, S. 120.

³ NICOLAUS 1996, S. 106, SANDNER et al. 1990, S. 112.

⁴ BEINER-BÜTH, BECKMANN 2007.

2.1 Begriffsdefinitionen

Neben dem Begriff „Rissverklebung“⁵ werden in der Literatur auch „Einzelfadenverklebung“⁶ und „Verleimung von Rissen“⁷ verwendet. Damit kann sowohl die Verklebung einzelner Fäden als auch eines ganzen Risses gemeint sein. Bezeichnungen wie „Riss- oder Fadenverschweißung“⁸ oder „Kauterisierung“⁹ werden teilweise irrtümlich verwendet, wenn ein Schmelzklebstoff mit Hilfe einer Heiznadel aufgebracht wird. Auch „Punktverklebung“¹⁰ als Ausdruck einer minimalen Klebestelle ist irreführend, da entweder eine Überlappung besteht oder, in seltenen Fällen, eine „Stoß-auf-Stoß-Verklebung“ vorgenommen wird, bei dem der Klebstoff eine Brücke zwischen den zwei Fadenenden bildet. Wenn Schmelzklebstoffe verwendet werden, um einen Riss zu schließen oder Fadenbrücken aufzubringen, spricht man auch von „Rissversiegelung“¹¹. Im letzten Fall wird auch „Rissverklammerung“¹² benutzt.

Im Folgenden soll für das Verbinden von zwei Fadenenden mit einem Klebstoff allein der Begriff Rissverklebung verwendet werden, da er sich in der Literatur durchgesetzt hat. Dem Fachpublikum ist bewusst, dass es sich dabei in der heute üblichen Form um das Schließen des Risses durch Verklebung der einzelnen gerissenen Fäden handelt.

2.2 Forschungsstand in der Literatur

Der Forschungsstand zur Methode und vor allem zu den Materialien der Rissverklebung ist in Anbetracht der häufigen Anwendung nicht ausreichend.

Eines der ersten Verfahren zur Klebung von kleinen Rissen publizierte im Jahr 1945 Kudrajawzew. Er schlägt vor, die Fäden miteinander zu „verflechten“, und der Rissbereich mit Fischleim oder Harz einzustreichen und mit Seidenpapier zu hinterkleben.¹³ Bis in die 70er Jahre des 20. Jhs. wurden Rissverklebungen ansonsten kaum thematisiert, da die Behandlung mit Flickern oder Doublierung vorherrschte. Man brachte der Methode vor allem in Bezug auf ihre Haltbarkeit wenig Vertrauen entgegen. Daher wurden in den 70er und 80er Jahren vor allem Klebemittel mit hoher Adhäsionskraft wie Epoxidharze eingesetzt. Publikationen von Kuiper/Hestermann 1976, Weddingen 1979 und Gabler 1980 erhöhten den Bekanntheitsgrad der Rissverklebung.¹⁴ Alle empfahlen die Verwendung von Epoxidharz, und nur die letzteren verzichteten auf eine anschließende Doublierung. Cederholm, Osmond und Heisterüber begannen kurz darauf, sich mit dem Vergleich verschiedener Klebemittel für die Rissverklebung zu beschäftigen.¹⁵ In den folgenden Jahren erprobte man diverse Klebstoffe, publizierte jedoch nur sehr wenige Erfahrungsberichte (siehe Kapitel 2.3). Erst die Einführung einer Heiznadel in die Restaurierungswerkstätten machte es möglich, Schmelzklebstoffe zu verwenden oder flüssige Klebemittel schneller trocknen zu lassen.¹⁶ Durch die Forschungen Heibers konnte sich die Rissverklebung letztlich als Methode zur Schließung von Rissen etablieren.¹⁷ Die Versuche, auf denen seine Aussagen basieren, wurden jedoch mittels einer Briefwaage und subjektivem Zug an Einzelfäden und mit einem Wassereimer an Gewebestreifen gemessen. Zudem testete er nur sechs Klebstoffe (Ponal, Mowilith DM1 und DM4, Plextol B500,

⁵ HEIBER 1996, S. 117.

⁶ BECKER 2002, S. 8.

⁷ HEIBER 1983/84, S. 36f.

⁸ HEDINGER 1997, S. 36; NICOLAUS 1996, S. 108.

⁹ ESSERS 1985, S. 42.

¹⁰ ROUX 1993, S. 8.

¹¹ SANDNER et al. 1990, S. 116.

¹² SANDNER et al. 1990, S. 113.

¹³ KUDRAJAWZEW 1945, S. 46f.

¹⁴ KUIPER, HESTERMANN 1976 (Klebungen mit Epoxidharz-getränkten Fadenbrücken gefolgt von einer Doublierung an Rembrandts Nachtwache), WEDDINGEN 1979 (schlägt eine Verklebung mit Epoxid, Beva oder Polyamid als Alternative zur Doublierung vor), GABLER 1980/81 (verklebt einen 2m langen Riss mit Epoxidharz und Epoxidharzgetränkten Leinenfasern als Fadenbrücken).

¹⁵ CEDERHOLM 1985, HEISTERÜBER 1985, OSMOND 1987.

¹⁶ HEIBER 1983/84, S. 37.

¹⁷ HEIBER 1996, HEIBER 2003.

12%iger Störleim und 20%iger Störleim mit 13%igem Weizenstärke im Verhältnis 1:1). Verschiedene Aspekte sind seitdem im Rahmen mehrerer Diplomarbeiten untersucht worden. Roux fasste in ihrer Diplomarbeit Forschungen und Überlegungen zur Rissverklebung zusammen.¹⁸ Eipper untersuchte die Eignung verschiedener PVAC-Dispersionen für die Rissverklebung.¹⁹ Becker untersuchte in ihrer Diplomarbeit Festigkeit und Elastizität von Einzelfadenverklebungen mit Acryldispersionen in der Textilrestaurierung.²⁰ Plötz versuchte, ein geeignetes Klebemittel für Risse in Polyesterweben zu finden.²¹ In einer weiteren Arbeit widmete sie sich dem Verkleben mit Wachs getränkter Fäden.²² Mit dem Verkleben von Rissen in Polyamidgeweben beschäftigte sich Nägler.²³

Keine dieser Untersuchungen bietet jedoch einen Vergleich aller üblichen Klebstoffe bei Leinenfäden. Zudem ist die Anzahl der Prüfkörper meist nicht ausreichend, so dass keine statistisch fundierten Aussagen über die Belastbarkeit der Verklebung gemacht werden können, oder die Prüfmethoden sind nicht objektiv. Trotz der zahlreichen recht positiv in ihrem Ergebnis ausfallenden Forschungsarbeiten wird immer noch Kritik an der Rissverklebung geäußert. In den meisten Fällen bezieht sie sich auf die Belastbarkeit und Haltbarkeit der Klebungen. So merkte z.B. Brachert an, dass das Problem der Klebemittel noch nicht befriedigend gelöst sei, da sich die Risse in vielen Fällen nach kurzen Anfangserfolgen spannungsreich verziehen oder wieder öffnen. Er nennt hierzu aber keine Beispiele.²⁴ Auch im englischsprachigen Ausland wird der Rissverklebung bisher häufig wenig Vertrauen entgegengebracht. Meist werden Epoxidharze zum Verkleben empfohlen, da die anderen Klebstoffe „zu schwach“ seien.

Auffallend ist das Fehlen einer verlässlichen Grundlage zum Einschätzen der Belastbarkeit von Fadenverklebungen und eines Vergleichs der heute üblichen Materialien.

2.3 Bisher gebräuchliche Klebstoffe

Zu den verwendeten Klebstoffen fällt der Forschungsstand sehr unterschiedlich aus. Hinzu kommt, dass sich die Untersuchungen in vielen Punkten, vor allem aber zum Alterungsverhalten in Umfang und Methodik unterscheiden und größtenteils nicht vergleichbar sind.

Bislang kam eine breite Auswahl an Klebemitteln für Rissverklebungen zur Anwendung. Die ersten Rissverklebungen in den 70er Jahren führte man mit Epoxidharz durch.²⁵ Auch heute noch werden sie vor allem für Stoß auf-Stoß-Verklebungen und wachsgetränkte Gewebe empfohlen.²⁶ Epoxidharz stellte sich auch als bestes Klebemittel für textile Träger aus Polyester (PETP) heraus.²⁷

Verwendete Produkte sind unter anderem Araldit Standard sowie Uhu plus endfest und schnellfest.

In den Anfängen der Rissverklebung verwendete man auch Acrylharzschmelzen.²⁸ So wurde beispielsweise Plexigum P24 oder auch Paraloid B72 zum Schließen von Rissen angewandt.²⁹ Auch Acrylharze in Lösung wurden benutzt.

Sandner nennt für die Rissverklebung 10%iges Pexisol P550, Paraloid B72 oder Piaflex F41 und LT30 in Benzin,³⁰ Worch nennt zusätzlich Paraloid F10.³¹

¹⁸ ROUX 1993.

¹⁹ EIPPER 1993.

²⁰ BECKER 2002.

²¹ PLÖTZ 2002.

²² PLÖTZ 2003.

²³ NÄGLER 2005.

²⁴ BRACHERT 1992, S. 332.

²⁵ WEDDINGEN 1979, S. 31; GABLER 1980/81, S. 23.

²⁶ HOFMANN 2003, S. 44; SANDNER 1990, S. 133; HEIBER 2003, S. 40.

²⁷ PLÖTZ 2002, S. 77.

²⁸ HEIBER 2003, S. 120.

²⁹ HACKE 1989, S. 52-59.

³⁰ SANDNER 1990, S. 133.

In den folgenden Jahren setzten sich jedoch Acrylharzdispersionen aufgrund der Lösungsmittelfreiheit und der besseren Modellierbarkeit der Fäden durch den Wasserzusatz durch. Sandner nennt eine Mischung aus Plextol D360 und D541 (9:1).³² Becker ermittelte in ihrer Diplomarbeit als besten Klebstoff für die Einzelfadenverklebung an Textilien eine wasserverdünnte Mischung der Acrylkleber Lascaux 360HV und 498HV (1:1).³³ Auch Worch hält die Acrylkleber Lascaux 360HV und 498HV für besonders empfehlenswert.³⁴ Bei von Hoff's Versuchen erwies sich die Dispersion Plextol B500 als gut geeignet.³⁵

Eine andere, häufig verwendete Klebstoffgruppe sind die Polyamidschmelzen.³⁶ Sie werden unter anderem für die Verklebung von Rissen in wachsextrahierten Geweben empfohlen.³⁷ Das verwandte lösliche Nylon Calaton fand ebenfalls Verwendung als Schmelzklebstoff.³⁸ Polyamid wurde zudem auch „punktartig“ zur Verstärkung von Verklebungen mit wässrigen Bindemitteln eingesetzt.³⁹

Ein weiteres als Schmelze aufgebrachtes Klebemittel ist BEVA 371.⁴⁰

Laut Eipper gehören PVAC-Dispersionen zu den am häufigsten verwendeten Klebemitteln für die Rissverklebung.⁴¹ Besonders häufig wird von Restauratoren Ponal-Holzleim genannt.⁴² Heiber verwendete PVAC an etwa 40 Gemälden ohne bisherige Beanstandung.⁴³ PVAC als Schmelzklebstoff wurde von Suhiko verwendet.⁴⁴ Von Hoff testete Mowilith SDM5 der Firma Clariant und Primal AC33 von Röhm&Haas.⁴⁵ Verwendung finden außerdem Mowilith DM1, DM5, DMC2, Mischungen aus Mowilith D und DM105, sowie Mischungen verschiedener Vinnapas-Sorten, etwa aus Vinnapas H60 und EP11, DP50 oder D40.⁴⁶ Auch natürliche Klebemittel wie Störleim finden häufig in verdickter Form Verwendung. Laut Heiber ist eine Mischung von 20%igem Störleim und 13%igem Weizenstärkekleister das bislang vorteilhafteste Klebemittel für die Rissverklebung.⁴⁷ Hofmann verwendete statt Weizenstärkekleister 1%iges JunFunori® als Verdickungsmittel für Störleim.⁴⁸ In Wien wird Störleim außerdem mit dem Celluloseether Tylose MH3000 angedickt, mit Glucose als Plastifizierungsmittel und mit Dialdehyd als Vernetzer versetzt.⁴⁹

Weitere, jedoch nur selten in der Literatur erwähnte Klebstoffe sind Polyvinylbutyral in Benzin⁵⁰ und Polyurethandispersionen.⁵¹

³¹ WORCH 2006, S. 29.

³² SANDNER 1990, S. 133.

³³ BECKER 2002, S. 144.

³⁴ WORCH 2006, S. 22.

³⁵ VON HOFF 2006, S. 46f.

³⁶ SANDNER 1990, S. 133.

³⁷ PLÖTZ 2003, BODECHTEL 2000, S. 37; ROUX 1993, S. 110.

³⁸ BODECHTEL 2000, S. 19.

³⁹ BODECHTEL 2000, S. 40.

⁴⁰ SANDNER 1990, S. 133; WORCH 2006, S. 22.

⁴¹ EIPPER 1993, S. 69.

⁴² Ponal Standard wird von GLANZER 1995, S. 74 als Standardklebemittel der HfAK Wien genannt.

⁴³ HEIBER 2003, S. 120.

⁴⁴ SUHIKO 1968, S. 23-31.

⁴⁵ VON HOFF 2006, S. 48.

⁴⁶ EIPPER 1993, S. 72. Im Stichting Kollektiv, Amsterdam, wurde eine Mischung aus 4 Teilen Vinapas EP11 (neuer Name Airflex EP11) und einem Teil Vinapas D40 (neuer Name Vinac D50 Dispersion) verwendet (freundliche mündliche Mitteilung von Dipl.-Rest. Christine Fröhner, Köln). BRACHT et al. 2003 (S. 26) verwendeten Vinapas EP11 und DP50 (4:1). Eine Erklärung für die Auswahl wird nicht gegeben.

⁴⁷ HEIBER 1996, S. 134.

⁴⁸ HOFMANN 2003, S. 47.

⁴⁹ GLANZER 1995, S. 90; WUNTSCHKE 1997, S. 135-138.

⁵⁰ SANDNER 1990, S. 133; SURVOV, YASHKINA 1979, S. 117-121.

⁵¹ MASSA et al. 1991; PLÖTZ 2002; NÄGLER 2005.

3 Leinenfäden

Im Folgenden soll die Beschaffenheit der physikalischen und chemischen Oberfläche von Leinefäden, soweit bekannt, beschrieben werden, damit die Adhäsion der Klebstoffe an diesem Material gedeutet werden kann. Zudem werden für eine Rissverklebung wichtige Eigenschaften der Leinenfäden angegeben.

Leinenfäden werden aus den Bastfaserbündeln der Flachspflanze *linum usitatissimum* Linné gesponnen.⁵² Die Bastfasern befinden sich in der Rindenschicht des Stengels der Flachspflanze und werden durch „Pflanzenleim“, eine pektinhaltige Kittsubstanz, zusammengehalten. Diese wird bei der Aufbereitung biologisch (Röste) oder chemisch zersetzt. Anschließend folgt eine mechanische Aufbereitung durch Brechen, Schwingen und Hecheln.⁵³

Unterschiede in Aufbau, Struktur und Eigenschaften der Flachsfasern sind üblich und beinahe unvermeidbar. Sie hängen unter anderem von der Flachssorte, dem Anbauggebiet, der Standweite, den Ernährungs- und den Wachstumsbedingungen ab. Eine zunehmende Reife lässt die Faser verholzen, verringert die Teilbarkeit der Faserbündel und somit die Feinheit.⁵⁴ Die Farbe der Fasern richtet sich nach dem angewendeten Röstverfahren. Bei der Wasserröste ist sie gelblich, bei der Tauröste silbergrau bis grünlich, chemisch gerösteter Flachs ist dagegen gelb- bis weißlich.⁵⁵ Kaltwasser- und taugerösteter Flachs haben den natürlichen Leinglanz, da Begleitsubstanzen (Pflanzenleime, Fette und Wachse) zum größten Teil erhalten bleiben, übergerösteter Flachs ist dagegen stumpf.⁵⁶

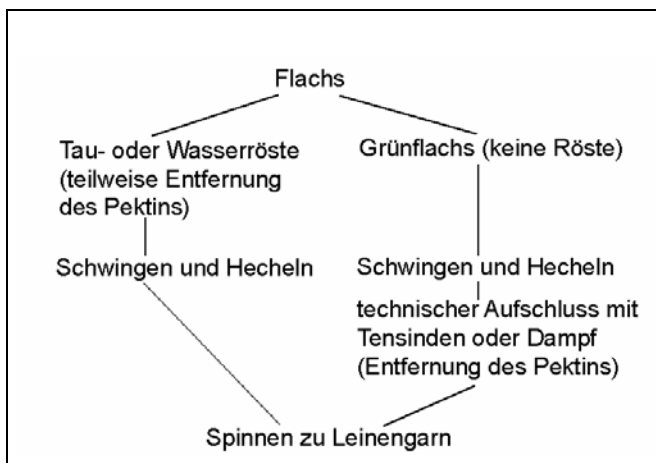


Abb. 1: Aufbereitungsarten für Flachsfasern

Weitere Unterschiede im Garnmaterial ergeben sich durch die verwendete Faserlänge, die Drehrichtung, den Drehwinkel, den Fadendurchmesser, die Feinheit, die Gleichmäßigkeit, den Spinnprozess und eventuell vorhandene Schichten. Beispielsweise sind nassgesponnene Fäden gleichmäßiger, aber auch teurer als trocken gesponnene.⁵⁷

Gerösteter Flachs besteht hauptsächlich aus Cellulose (64,1%), Hemicellulose (16,7%), Pektin (1,8%) und Lignin (2,0%), während Fette, Wachse und Eiweißstoffe nur einen geringen Anteil ausmachen.⁵⁸ Durch die Art der Aufbereitung variieren die Anteile (siehe Abb. Tab. 1)

⁵² KOCH 1994, S. 765.

⁵³ KOCH 1994, S. 768-770; BEIER 2000, S. 55.

⁵⁴ KOCH 1994, S. 772.

⁵⁵ KOCH 1994, S. 772.

⁵⁶ KOCH 1994, S. 772.

⁵⁷ Freundliche mündliche Mitteilung von Dipl. Ing. Felicitas Weiße, FH Köln.

⁵⁸ BEIER 2000, S. 57.

Geheckelte Leinenfaser	Bast	Taugeröstet	Wassergeeröstet	Dampfgeröstet
Aschegehalt, %	-	1,37	1,01	-
Lignin, %	8,4	5,71	5,96	6,3
Lignin säureunlöslich	-	4,32	4,98	-
Lignin säurelöslich	-	1,39	0,98	-
Pektinsubstanzen (PS), % der Einwaage	6,88	3,03	2,28	4,7
Polyuronsäuren, % der PS	49,42	40,8	50,3	52,4
Hexosane, % der PS	33,14	43,8	34,2	31,0
Pentosane, % der PS	17,44	15,4	15,5	14,5
Hemicellulosen (HC), % der Einwaage	8,3	7,41	7,14	6,10
Polyuronsäuren, % der HC	18,7	9,4	13,3	17,2
Hexosane, % der HC	56,3	71,8	69,2	62,4
Pentosane, % der HC	25,0	18,8	18,4	20,4
Summe der Kohlenhydrate (KH), % der Einwaage	13,4	10,7	9,4	10,8
Polyuronsäuren, % der KH	29,69	18,87	21,6	32,60
Hexosane, % der KH	49,03	64,9	62,1	49,88
Pentosane, % der KH	21,28	16,5	16,3	17,59

Tabelle 1: Analyseergebnisse der chemischen Zusammensetzung von Flachsfasern, die aus einer einheitlichen Strohpartie hergestellt wurden

Die äußerste Schicht der aufbereiteten Leinenfaser (d.h. der Fasern im Leinenfaden) ist die Sklerenchym⁵⁹-Mittellamelle. Sie verkittet die Elementarfasern (Bast-Einzelzellen) miteinander und besteht vor allem aus calciumhaltigem Pektin⁶⁰ mit Lignineinlagerungen. Sie ist daher äußerst resistent gegen chemische und enzymatische Einflüsse und wird normalerweise durch die Röste nicht angegriffen.⁶¹ Dagegen wird die Parenchym⁶²-Mittellamelle, die die Flachsfaserbündel umgibt, durch stufenweisen Pektinabbau bei der Röste zerstört.⁶³ Bei der chemischen Aufbereitung und bei dampfgerösteten Fasern sind die Pektine vollständig abgebaut.⁶⁴ Es folgen im Faserquerschnitt nach innen Primär- und Sekundärwand, die hauptsächlich aus Cellulosefibrillen bestehen, sowie Tertiärwand und Lumen. In den Cellulosefibrillen wechseln sich amorphe und teilkristallin geordnete Bereiche ab.⁶⁵

Bei den meisten Gemäldebildträgern muss also mit einer Pektinschicht auf den Fasern gerechnet werden, die zum großen Teil die Adhäsionseigenschaften bestimmt. Hauptbestandteil von Pektin ist Pektinsäure (1,4-glucosidisch verknüpft Polysaccharid aus Galakturonsäurebausteinen). Ein Teil der funktionellen Gruppen bilden Methylester (mittelpolare Bindungsstellen), während andere wasser-unlösliche Calcium- oder Magnesiumsalze (polare Bindungsstellen) bilden.⁶⁶ Bei neueren Bildträgern kann das Pektin durch alternative Aufschlussverfahren jedoch völlig entfernt sein. Die Klebung erfolgt in diesem Fall auf einer reinen Celluloseoberfläche. Auch im Verlauf der Alterung des textilen Trägers kann es zu einer Reduzierung der äußersten, pektinhaltigen Schicht kommen, da sie aufgrund ihres amorphen und hygroskopischen Charakters sowie des leicht abbaubaren Pektins besonders anfällig gegenüber Alterungsmechanismen ist.⁶⁷

⁵⁹ voll ausdifferenzierte Fasern, die kein Plasma mehr enthalten (also „tot“ sind).

⁶⁰ Pektin= 1,4-glucosidisch verknüpft Polysaccharid aus Galakturonsäurebausteinen.

⁶¹ ROUETTE 1995, S. 652.

⁶² lebende, mit Zellplasma gefüllte Zellen.

⁶³ ROUETTE 1995, S. 652.

⁶⁴ ROUETTE 1995, S. 651.

⁶⁵ VITI, HAUDEK 1981, S. 80.

⁶⁶ TIMAR-BALASZY, EASTOP 1998, S. 32.

⁶⁷ TIMAR-BALASZY, EASTOP 1998, S. 34.

Eine Vielzahl von weiteren Materialien kann bei der Fadenherstellung als Schlichte⁶⁸ aufgebracht werden. Genannt werden unter anderem Stärke, Gummen, Cellulosederivate, Harze, Öle, Wachse, Zucker, Glutine, Bier, Wasserglas, Silikonharze, Formaldehyde und Tetrafluorethylen (Teflon).⁶⁹ Sie sollen die Verarbeitbarkeit des Fadens beim Spinnen und Weben verbessern oder wasserabweisende, antistatische, feuerhemmende oder insektizide Wirkung haben. Diese Stoffe liegen dann auf den Faseroberflächen und sind mitbestimmend für deren Adhäsionseigenschaften.

Eine einzelne Leinenfaserzelle stellt ein polygonales, in die Länge gezogenes Prisma dar, dessen beide Enden spitz zulaufen. Auch abweichende Formen, wie zum Beispiel an der Stengelbasis, wo die Fasern einen schlauchförmigen Querschnitt zeigen und die Faserenden abgerundet sind, sind möglich.⁷⁰ Die Oberfläche ist glatt und teilweise auch fibrilliert (Längsrillen).⁷¹ Als charakteristische Struktur zeigt die Flachsfaser in Längsrichtung knotige Anschwellungen oder auch sogenannte Verschiebungen.⁷² Im Querschnitt zeichnen sich Flachsfasern durch eine verhältnismäßig starke Wanddicke und ein kleines Lumen (Zellinnenhohlraum) aus.⁷³ Weiterhin sind im Querschnitt angeschnittene Wanddurchbrüche wie Poren und Tüpfel erkennbar, diese sind aber durch die Primärwand nach außen verschlossen.⁷⁴ Flachsfasern zählen zu den besonders unelastischen Fasern. Sie können durch Spannungen nur sehr wenig gedehnt werden.⁷⁵ Durch das Spinnen kann der Faden jedoch deutlich dehnbarer sein als die einzelnen Fasern. Beim Spinnen werden die Leinenfaserbündel miteinander verdreht. Dabei bleiben fast keine Hohlräume bestehen, da die Fasern beim Spinnen eng aneinandergespreßt werden.⁷⁶ Während des Spinnens sowie auch schon beim Trocknen nach der Röste sind Verformungen der Fasern möglich.⁷⁷ Wie im Querschnitt des für die Versuche dieser Arbeit verwendeten Leinenfadens zu sehen, sind die Fasern unterschiedlich dick, unterschiedlich geformt und gefärbt (siehe Abb. 4). Die dunkleren Zwischenräume stellen Hohlräume dar, in die das Klebemittel eindringen kann. Durch die aneinandergespreßten Fasern bleiben nur wenige und enge Hohlräume zum Eindringen für das Klebemittel übrig.

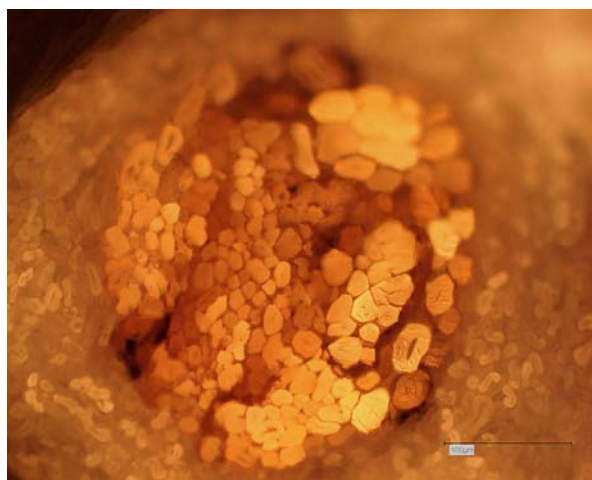


Abb. 2: Querschnitt des für die Versuche in dieser Arbeit verwendeten Leinenfadens. Die Fasern sind unterschiedlich dick, unterschiedlich geformt und gefärbt. Die dunkleren Zwischenräume stellen Hohlräume dar.

⁶⁸ Schlichten bezeichnet die Behandlung von Garnen vor dem Verweben, wodurch ihre Glätte, Geschmeidigkeit, Geschlossenheit und Festigkeit verbessert wird. Die Verarbeitung auf dem Webstuhl wird damit erleichtert.

⁶⁹ TIMAR-BALASZY, EASTOP 1998, S. 101.

⁷⁰ KOCH 1994, S. 771. Ein qualitativ hochwertiger Flachs zeigt in seinen Elementarfasern 3-7 Kanten, schlechte Fasern sind oval (ROUETTE 1995, S. 652).

⁷¹ LATZKE 1988, S. 40.

⁷² KOCH 1994, S. 772. Er merkt weiter an, dass es über die Entstehung keine eindeutigen Hinweise gibt.

⁷³ KOCH 1994, S. 771; WÜLFERT 1999, S. 275.

⁷⁴ WÜLFERT 1999, S. 248 und S. 256.

⁷⁵ TIMAR-BALASZY, EASTOP 1998, S. 34.

⁷⁶ TOST 2005, S. 9.

⁷⁷ Freundliche mündliche Mitteilung von Gesa Bernges, Köln.

Rissverklebungen werden häufig mit Wärme und/ oder wässrig gebundenen Klebemitteln durchgeführt. Bei Wassereinwirkung laufen zwei parallele Prozesse ab: zum einen werden Wassermoleküle durch chemische Bindung an die reaktionsfähigen Gruppen der Faser gebunden, zum anderen wird Wasser innerhalb der intermolekularen Zwischenräume in den amorphen Bereichen über physikalische Bindung aufgenommen.⁷⁸ Durch die eindringenden Wassermoleküle kommt es zur Quellung der Faser, das vor allem in einem Dickenwachstum sichtbar wird. Gleichzeitig kommt es zu einer Kontraktion der Länge.⁷⁹ Im Gewebe kommt es dadurch zu Schrumpfungsprozessen. Ein einzelner Faden dagegen dreht sich auf und verlängert sich dabei meist. Diese Prozesse sind jedoch bei dem geringen befeuchteten Bereich während einer Rissverklebung zu vernachlässigen.

Zu hohe Temperaturen sind schädlich für Cellulosefasern, vor allem oxidierte Fasern reagieren sehr empfindlich. Bei hoher Hitze kommt es zu Quervernetzungen, Kettenbrüchen und thermischen Oxidationsreaktionen. Das Material wird steif, brüchig und verfärbt sich gelblich-braun; die mechanische Belastbarkeit nimmt ab.⁸⁰

Obwohl neue Leinenfasern eine kurze Behandlung mit kalten verdünnten Säuren vertragen und eine hohe Beständigkeit gegenüber Laugen besteht, können abgebaute, gealterte Fasern sehr empfindlich gegenüber den mildesten alkalischen oder sauren Behandlungen reagieren, besonders wenn sie schon photochemischem Abbau unterworfen waren.⁸¹ Die Verwendung von Klebemitteln muss daher in Hinblick auf den pH-Wert dem Alter des textilen Trägers angepasst sein. Im Laufe der Alterung verschiebt sich der pH-Wert von Leinen in den sauren Bereich (pH 4)⁸² und die Zugfestigkeit nimmt ab.⁸³

Im Laufe der natürlichen Alterung werden Kettenmoleküle abgebaut. Durch die Einwirkung von Licht, Wärme, Feuchtigkeit und mechanischer Belastung wird dieser Abbau beschleunigt.⁸⁴ Folgen sind sowohl eine Verkürzung der Kettenlänge der Celluloseketten als auch eine Lockerung der intramolekularen Anziehungskräfte.⁸⁵ Auch Pektin und Lignin werden zu kürzeren Ketten abgebaut, was zu einer weiteren Schwächung beiträgt.⁸⁶

In Bezug auf die Rissverklebung bedeutet dies, dass Leinefasern sowohl in ihrer chemischen Oberfläche als auch in ihrem physikalischen Aufbau deutliche Unterschiede aufweisen, die vor allem von den Wachstumsbedingungen, der Aufbereitung und der Alterung abhängig sind. Es muss also davon ausgegangen werden, dass bei Leinenfäden unterschiedliche Adhäsionseigenschaften vorkommen können.

Außerdem wird deutlich, dass hohe Temperaturen und ein zu hoher oder zu niedriger pH-Wert bei der Verklebung vermieden werden sollten, da sie zu Schäden in den ohnehin schon durch den Riss geschwächten Fasern führen können.⁸⁷

⁷⁸ BEIER 2000, S. 59.

⁷⁹ BEIER 2000, S. 60.

⁸⁰ TIMAR-BALASZY, EASTOP 1998, S. 27, S. 35f.

⁸¹ TIMAR-BALASZY, EASTOP 1998, S. 36.

⁸² HEDLEY 1993, S. 63.

⁸³ HEDLEY 1993, S. 59f.

⁸⁴ BEIER 2000, S. 62.

⁸⁵ BEIER 2000, S. 62.

⁸⁶ BEIER 2000, S. 63.

⁸⁷ TIMAR-BALASZY, EASTOP 1998, S. 27, S. 35f

4 Klebemittel

In der DIN EN 923:2005 ist Klebstoff definiert als „ein nichtmetallischer Stoff, der Werkstoffe durch Oberflächenhaftung (Adhäsion) so verbinden kann, dass die Verbindung eine ausreichende innere Festigkeit (Kohäsion) besitzt“. Im Fall der Verklebung von Leinenfäden ist damit die Verbindung von zwei Bündeln parallel nebeneinander liegender, dünner, zylindrischer, poröser und elastischer Fasern gemeint.⁸⁸

4.1 Theoretische Grundlagen der Fadenverklebung

Für die Festigkeit einer Klebung spielt das Verhältnis von Adhäsionsfestigkeit zu Kohäsionsfestigkeit eine wichtige Rolle: Ohne Adhäsion ist trotz hervorragender Kohäsion keine feste Verklebung möglich; umgekehrt gilt das gleiche. Im Folgenden sollen daher Adhäsion und Kohäsion erläutert werden.

Die Haftung eines Klebstoffs an den Fadenoberflächen wird beeinflusst durch die Art und die Größe der Wechselwirkungen an der Kontaktfläche (z.B. Polarität und funktionelle Gruppen von Klebstoff und Fasern, Benetzung der Fasern durch den Klebstoff), absorbiertes Wasser und Verunreinigungen, Diffusion des Klebstoffs in die Fäden und die Oberflächenstruktur der Fäden.

Die Adhäsionskräfte sollten über eine möglichst große Fläche verteilt sein, um punktuelle Belastungen zu vermeiden. Für die Rissverklebung bedeutet dies, dass die Fäden möglichst überlappen sollten, um die Adhäsionsfläche zu vergrößern. Die Entfernungen, über die Adhäsionskräfte wirken können, sind sehr gering. Sie bewegen sich in der Größenordnung von hunderttausendstel Millimetern (0.1-1 nm).⁸⁹

Daher ist eine gute Benetzung Voraussetzung für eine gute Klebung. Die Benetzung ist abhängig von Benetzungswinkel, Oberflächenspannung und

Viskosität des Klebstoffs. Um alle Höhen und Tiefen der Leinenfaseroberfläche zu benetzen, darf der Klebstoff daher nicht zu hochviskos sein.

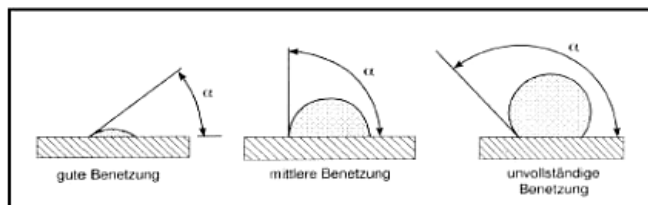


Abb. 3: Die Benetzbarkeit eines Festkörpers durch ein Klebemittel wird durch den Randwinkel α bestimmt. Je kleiner der Winkel ausfällt, desto besser ist die Benetzung.

Es wird in mechanische, spezifische und Auto-Adhäsion unterschieden:

Unter mechanischer Adhäsion wird eine mechanische Verklammerung in den Poren und Kapillaren der Faseroberfläche verstanden. Sie entsteht durch das Verfestigen des flüssigen Klebstoffs in der porösen Oberfläche, der dort eine formschlüssige Verankerung mit der Faser bildet. Die spezifische Adhäsion beruht auf zwischenmolekularen und chemischen Bindungen zwischen Klebstoff und Faser. Die heutigen Kenntnisse über die spezifische Adhäsion können jedoch noch nicht alle beobachteten Erscheinungen erklären.⁹⁰ Für eine starke Haftung sollten die Bindungsenergien von Klebstoff und zu verklebendem Material möglichst gleich sein. Kristalline Bereiche im Klebstoff, aber auch in der Leinenfaser wirken sich negativ auf diese Form der Adhäsion aus, da durch den regelmäßigen Aufbau die

⁸⁸ HEIBER 1996, S. 131.

⁸⁹ HABENICHT 1997, S. 61.

⁹⁰ HABENICHT 1997, S. 229.

Nebenvalenzkräfte weitgehend gegenseitig abgesättigt sind.⁹¹ Die Auto-Adhäsion beschreibt die Adhäsion durch Diffusion der Klebstoffmoleküle in die Leinenfasern durch Brown'sche Bewegungen⁹² in Abhängigkeit von der Molekülstruktur des Klebemittels.

Grundsätzlich beruht die Ausbildung der Bindungskräfte im Gegensatz zu Werkstoffen mit glatter Oberfläche bei Textilien zum überwiegenden Teil auf der mechanischen Adhäsion. In Ergänzung hierzu sind zwischen-molekulare Kräfte an der Festigkeit der Bindung beteiligt (siehe Abb. 4).⁹³

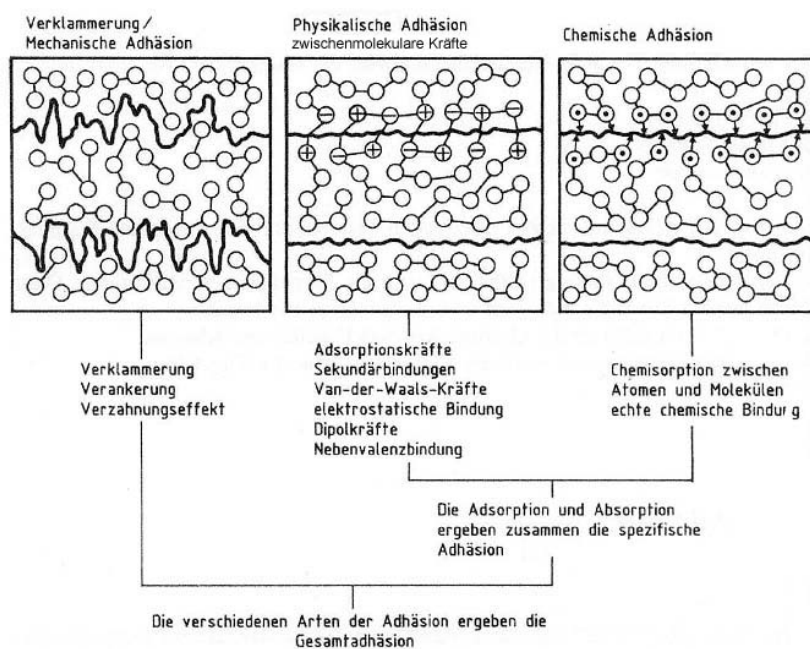


Abb. 4:
Mechanische
und spezifische
Adhäsion

Unter Kohäsion versteht man das Wirken von Anziehungskräften innerhalb eines Stoffes.⁹⁴ Sie hängt unter anderem davon ab, wie hoch Polarität und Molekulargewicht des Klebstoffs sind, aber auch inwieweit die Ordnung der Moleküle beim Trocknen oder Abkühlen (wieder)hergestellt wird.⁹⁵ Je geordneter die Moleküle sind, desto stärker wirken auch zwischenmolekulare Kräfte und desto stärker ist die Kohäsion. Auch Fehlstellen oder Luftblasen vermindern die Festigkeit der Klebung. Bestimmende Faktoren für die Kohäsion sind der Glasübergangspunkt, die Zugfestigkeit und das Dehnungsvermögen des Klebstoffs.

Die Zugfestigkeit bietet den Kräften Widerstand, die beim Aufspannen des Gemäldes entstehen und die Fäden unter kontinuierlicher Spannung halten. Der Klebstoff sollte daher eine ausreichende Zugfestigkeit besitzen, um irreversible Dehnungen zu vermeiden. Es kann allgemein gesagt werden, dass sich Zugfestigkeit und Elastizität einer Klebung umgekehrt proportional zueinander verhalten - je höher die Zugfestigkeit, desto geringer die Elastizität.⁹⁶ Unter Elastizität versteht man eine reversible Dehnung des Klebstoffs. Im Gegensatz dazu wird die bei höherer Belastung auftretende irreversible Verformung als Fließen oder plastische Verformung bezeichnet.⁹⁷ Dabei verringern sich die

⁹¹ PLÖTZ 2002, S. 35.

⁹² Bewegung von Teilchen durch zufälligen Zusammenstoß mit anderen Teilchen. Dabei erfahren sie jedes Mal eine neue Kraft/ einen neuen Impuls, der zu einer weiteren zufälligen Bewegung führt.

⁹³ HABENICHT 1997, S. 644.

⁹⁴ HABENICHT 1997, S. 301f.

⁹⁵ HABENICHT 1997, S. 302.

⁹⁶ DOWN et al. 1996, S. 30.

⁹⁷ HABENICHT 1997, S. 254.

innere Festigkeit und Glasübergangstemperatur des Klebstoffs.⁹⁸ Bei Dauerbelastungen kann es bei einigen Klebstoffen zusätzlich zum so genannten Kriechen kommen. Darunter versteht man die zeitlich verzögerte Deformation unter konstanter Belastung.⁹⁹ Durch das Kriechen werden Spannungen¹⁰⁰ innerhalb des Klebstoffs durch plastische Verformung abgebaut.¹⁰¹ Das Kriechen kann durch das in zeitlicher Folge eintretende Versagen einzelner Bindungen zwischen den Molekülen erklärt werden. Die Belastung bewirkt eine Molekülverschiebung, die aufgelösten Bindungen werden dabei nur teilweise durch neue Bindungen ersetzt. Mit fortschreitender Lockerung erschöpft sich die Verformungsmöglichkeit nach einer gegebenen Zeit und es kommt zum Bruch. Die kontinuierlichen Belastungen führen somit zu einem Festigkeitsverlust.¹⁰²

Bei der Klebung von Leinenfäden gibt es verschiedene Verbindungsmöglichkeiten: Die höchste Belastbarkeit erhält man durch eine möglichst große Überlappung der Fadenenden. In diesem Fall treten bei einer Belastung Scherkräfte auf einer längeren Strecke auf, außerdem werden so die Schälkräfte an den Rändern der Klebung verringert.¹⁰³ Damit eine möglichst große Klebefläche entsteht, sollten alle Fadenenden mit Klebstoff getränkt oder von diesem dünn umhüllt sein (dieser allerdings nicht herausquellen) damit alle Fasern miteinander und mit dem Klebstoff in Berührung sind. Bei einer idealen Verklebung reichen die ausgefranzten Fasern ineinander und erhöhen so die mechanische Verklammerung. In Fällen, bei denen keine Überlappung möglich ist, können die Fäden auch „Stoß-auf-Stoß“ verbunden werden. Dabei stoßen die Fasern in den seltensten Fällen direkt aneinander, sondern sind „ein Gespinst aus unterschiedlich langen Faserspitzen“¹⁰⁴, die kaum oder keine Überlappung aufweisen. Da die Verbindung dann nur auf einer kleinen Fläche stattfindet, wird diese höher belastet, wenn Zugkräfte auftreten.¹⁰⁵ Empfehlenswert für jede andere Art von Verklebung ist die Anwendung von Druck, denn die Klebung hält umso besser, je enger die Klebefuge zusammengepresst und die Klebschichtdicke reduziert ist.¹⁰⁶ Durch den kombinierten Einsatz von Temperatur und Druck kann die Bildung von Hohlräumen verhindert, die Benetzung verbessert, der Kontakt zwischen Klebstoffmolekülen und Faser erhöht, die Diffusion und damit die Adhäsion verstärkt, die Oberflächenspannung herabgesetzt und die Reaktionsgeschwindigkeit gesteigert werden.

Außer Druck und Temperatur ist auch die Viskosität des Klebstoffs von Bedeutung. Das Eindringen des flüssigen Klebstoffs in die Leinenfasern kann zu unzureichenden Klebschichtdicken führen. Je nach Saugfähigkeit der Fasern sind entsprechende Viskositäten vorzusehen, gegebenenfalls kann über eine Thixotropierung oder über die Größe der Polymerpartikel ein Wegschlagen verhindert werden.¹⁰⁷

Anwendungstechnisch lassen sich Klebstoffe in vier Kategorien unterteilen. Sie können als Dispersion, in Lösung oder als Schmelze angewendet werden, oder sie härten durch eine chemische Reaktion. Das Abbinden der gelösten Klebstoffe und der Dispersionsklebstoffe wird durch das Verdunsten des Wassers oder Lösungsmittels bzw. deren

⁹⁸ HORIE 1994, S. 19.

⁹⁹ HABENICHT 1997, S. 254.

¹⁰⁰ Eigenspannungen in Klebungen können durch unterschiedliche Volumenänderungen von Klebstoff und Leinenfasern bei Temperaturwechseln oder Luftfeuchtewechseln entstehen. Spannungen können auch durch das Schwinden der Klebung durch höhere Dichte, Abgabe von Spaltprodukten, Lösungsmittelresten oder Wasser sein.

¹⁰¹ HABENICHT 1997 S. 260.

¹⁰² HABENICHT 1997, S. 254.

¹⁰³ YOUNG 2003, S. 55.

¹⁰⁴ HEIBER 1996, S. 132.

¹⁰⁵ YOUNG 2003, S. 55.

¹⁰⁶ HEIBER 1996, S. 131.

¹⁰⁷ HABENICHT 1997, S.647f.

Aufnahme in den Leinenfaden eingeleitet. Dabei erhöht sich die Teilchenkonzentration bis zur Berührung.¹⁰⁸ Gleichzeitig erfolgt die Ausbildung der Haftungskräfte zur Leinenfaser. Die Fadenenden müssen zusammengeführt werden, solange der Klebstoff flüssig ist (bei kleinen Mengen wie in der Rissverklebung ist dieser Moment meist sehr kurz), damit die notwendige Adhäsion stattfindet.¹⁰⁹ Der anschließend ausgeübte leichte Druck einer Heiznadel bringt die Fadenenden enger zusammen und bewirkt damit eine verbesserte Haftung, während durch die Wärme eine schnellere Trocknung erreicht wird.

Bei Schmelzklebstoffen wird der Festigkeitsgrad vorübergehend durch Wärme herabgesetzt, wodurch die Molekülbeweglichkeit zunimmt. Infolgedessen erreicht der Klebstoff fließende Eigenschaften unter dem Druck der Heiznadel, und das Polymer wird so in die Grenzschicht der Fasern eingedrückt.

Bei chemisch härtenden Klebstoffen wie den Epoxidharzen vernetzen die Bestandteile des Klebstoffs an der aufgetragenen Stelle. Sie brauchen dazu weder Druck noch Wärme.

Rissverklebungen müssen laut Heiber „unübersichtlichen Spannungszuständen (Biege- und Schälspannung, Schermoment)“ widerstehen.¹¹⁰ Jede Bewegung des verklebten Leinenfadens, sei es durch äußere Belastungen oder eigene Quell- und Schrumpfbewegungen, hat Druck- und Zugkräfte zur Folge und belastet die Klebefläche. Die ersten Spannungen treten beim Aufspannen des Gemäldes nach der Rissverklebung auf. Aber auch späteres Auskeilen, Transporte und Eigenbewegungen des Gemäldes durch Klimawechsel können Spannungsänderungen hervorrufen. Dabei entstehen sowohl Zugspannungen als auch Biegespannungen, da die Fäden im Gewebe umeinander geschlungen sind und sich die Biegung z.B. beim Quellen der Fäden erhöht. Ebenso ist dies der Fall bei erneuter Belastung senkrecht zur Bildfläche, unter anderem bei Kittung und Retusche der Fehlstelle über dem verklebten Riss.

Eine Klebung kann in unterschiedlichen Weisen versagen. Bei einem Adhäsionsbruch löst sich die Bindung zwischen Klebemittel und Leinenfäden. Bei einem Kohäsionsbruch gibt das Klebemittel selbst nach. Wenn das Klebemittel brüchig ist, wird es brechen, wenn das verklebte Material nicht den Spannungen nachgibt. Wenn es einen niedrigen Glasübergangspunkt hat, wird die Bindung langsam durch Kriechen gestreckt und bis zum Bruch verformt.¹¹¹ Bei schnellen Belastungen z.B. durch Schlag oder Stoß ist keine Relaxation durch Molekümlagerungen möglich, durch das Fehlen der zeitverzögerten Verformung kommt es zum Bruch.¹¹²

4.2 Kriterien für die Klebstoffauswahl

Klebmittel für eine Rissverklebung müssen einer Vielzahl von Anforderungen genügen. Diese können nicht alle gleichzeitig erfüllt werden und widersprechen sich sogar teilweise.¹¹³ Für jeden Riss muss daher die Relevanz eines jeden Kriteriums erneut abgewogen werden.

Die Wahl des Klebstoffs richtet sich vor allem nach dem zu verklebenden Material und nach der Beanspruchung der Klebestelle.

¹⁰⁸ HABENICHT 1997, S. 187.

¹⁰⁹ HEIBER 1996, S. 132.

¹¹⁰ HEIBER 1996, S. 131.

¹¹¹ HORIE 1994, S. 74.

¹¹² HABENICHT 1997, S. 255.

¹¹³ YOUNG 2003, S. 55f.

4.2.1 Mechanische Eigenschaften

Klebkraft: Es sollte eine möglichst hohe Klebkraft bei möglichst geringem Materialeinsatz angestrebt werden, damit kein Verdicken der Klebestelle eintritt.

Benetzung: Für eine gute Adhäsion auf Leinenfasern muss eine gute Benetzung vorliegen (So wird z.B. für wachsgetränkte Fasern ein unpolarer Klebstoff benötigt.¹¹⁴)

Kohäsion: Die Kohäsion der Klebestelle sollte der des Fadens entsprechen. Der Klebstoff sollte ausreichende Kohäsion besitzen, um die Verklebung trotz der in der Leinwand herrschenden Spannungsverhältnisse zu erhalten. Im Idealfall hätte die Verklebung eine minimal geringere Festigkeit als die Fäden des textilen Trägers, damit bei einer erneuten Stoßbelastung die Verklebung zuerst nachgibt.

Die benötigte Festigkeit orientiert sich auch an der Art des Risses und des Gewebes. So brauchen Risse in Ecken und längere Risse stärkere Klebstoffe. Neue Gemälde brauchen dagegen elastischere Klebstoffe, da sie stärker auf Klimaschwankungen reagieren und der Klebstoff die Quell- und Schrumpfprozesse möglichst nicht behindern sollte.¹¹⁵

Eine Resistenz der Verklebung gegenüber Belastungen wie Bewegungen, Erschütterungen, Vibrationen und Zug ist wünschenswert. Im Fall einer plötzlichen und starken Zugausübung sollte sich die Klebestelle allerdings zugunsten der „intakten“ nicht verklebten Bereiche lösen. Das Versagen der Klebestelle unter Belastung sollte dabei möglichst langsam und nicht ruckartig (wie bei einem Spröbruch) geschehen, damit sich der Riss nicht sofort vergrößert.¹¹⁶

Das Klebemittel sollte nicht härter als der verklebte Leinenfaden sein, damit er bei Belastungen nicht beschädigt wird.

Bei einer auf die Verklebung folgenden Kittung sollte nach Cederholm das Klebemittel fester als die Kittung sein, da diese sonst die Verklebungsstelle dominiert.¹¹⁷

Elastizität: Eine gewisse Elastizität sollte vorhanden sein, um die Bewegungen des Bildträgers bei Klimaschwankungen und mechanischen Belastungen mitzumachen oder aufzufangen. Die Elastizität des Klebstoffs sollte dabei höher sein als die der Fäden, um starke Beanspruchungen an den Rändern der Klebeverbindung zu vermeiden. Die Rissverklebung sollte aber auch steif genug sein, um sich nicht zu verformen. Damit dies nicht passiert, muss die Verklebung genauso steif sein wie der textile Träger. Im Falle einer zu geringen Elastizität bzw. zu hohen Steifheit der Klebestelle reiben sich die Leinenfasern bei Belastung kontinuierlich bei ihren Bewegungen an dieser Stelle. Sie werden somit geschwächt und es entsteht eine neue Sollbruchstelle neben der Verklebung. Laut Berger und Russell muss der Klebstoff mindestens so steif sein wie die Leinwand mit darauf liegender Bildschicht, damit sich keine Deformationen im Rissbereich ergeben.¹¹⁸

Dehnbarkeit: die Dehnbarkeit sollte sich im mittleren Bereich befinden, da sich die Klebung bei zu niedriger Dehnbarkeit schon bei minimaler Belastung lösen würde.¹¹⁹ Bei zu hoher Dehnbarkeit der Klebung wird die Zugspannung an der Klebung verstärkt. Dies kann zu Deformationen im Bereich der Klebung sowie zu ihrem Lösen führen. Der Versuch, die Flexibilität der Fäden so weit wie möglich zu erhalten, könnte dem Hauptziel, nämlich einer ausreichend hohen Zugkraft, entgegenstehen. Elastizität und Flexibilität haben bei der Klebstoffauswahl daher einen niedrigeren Stellenwert als die Festigkeit, bzw. sind als zweitrangig einzustufen.¹²⁰ Unter kontinuierlicher Belastung,

¹¹⁴ PLÖTZ 2003, Teil 2, S. 7.

¹¹⁵ HEISTERÜBER 1985, S. 8.

¹¹⁶ YOUNG 2003, S. 56.

¹¹⁷ EIPPER 1993, S. 70; CEDERHOLM 1985.

¹¹⁸ BERGER, RUSSELL 1993, S. 114.

¹¹⁹ BECKER 2002, S. 54.

¹²⁰ BECKER 2002, S. 55.

wie sie bei aufgespannten textilen Trägern üblich ist, sollte keine Verformung des Klebstoffes durch Relaxation oder kalten Fluss erfolgen.

*Glasübergangspunkt (T_g)*¹²¹: Der Glasübergangspunkt sollte laut Plötz zwischen 40 und 65 °C liegen.¹²² Bei höherem T_g sei die Klebestelle zu spröde, um Belastungen auszuhalten. Laut Horie sollte ein thermoplastischer Klebstoff einen T_g über 40 °C haben, da darunter bei kontinuierlicher Belastung Deformationen auftreten können.¹²³ Klebstoffe mit einem T_g in der Nähe oder unter der Raumtemperatur sollten nur verwendet werden, wenn keine langzeitigen Belastungen auftreten.

Schmelztemperatur: Bei einem Schmelzklebstoff sollte die Schmelztemperatur nicht zu hoch liegen (laut Becker nicht über 65 °C)¹²⁴, um die Leinenfasern nicht durch erhöhte Temperaturen zu belasten. Wärme beschleunigt die chemischen Alterungsreaktionen eines Kunstwerks. Außerdem kann die Malschicht schon bei geringen Temperaturen verformt werden.¹²⁵ Bei Gemälden des 19. Jahrhunderts können laut Fromm schon ab 75 °C Oberflächenveränderungen der Malschicht auftreten.¹²⁶

Beständigkeit gegenüber Klimaschwankungen: Die Klebung solle einer Lagerung und Präsentation in feuchten und trockenen Räumen oder bei extremen Klimaschwankungen (z.B. in Kirchen) standhalten, und dabei möglichst nicht in Festigkeit und Flexibilität variieren. In einer klimatisierten Umgebung ist dieser Aspekt zweitrangig. Die Verklebung sollte auch Klimaschwankungen bei Konservierungsmaßnahmen, zum Beispiel feuchten Planierungen oder Malschichtfestigungen mit wässrigen Bindemitteln aushalten. Brachert ist der Meinung, dass die Klebstoffe auf Feuchtigkeit möglichst nicht reagieren sollten.¹²⁷ Hingegen wäre es auch denkbar, dass das Klebemittel möglichst das gleiche Verhalten wie die Leinenfasern bei Feuchtigkeit aufweisen sollte, um diese keinen weiteren mechanischen Belastungen auszusetzen. Ein geeigneter Rückseitenschutz und präventive Maßnahmen zur Klimaregulierung sollten die Beständigkeit der Rissverklebung unterstützen.

4.2.2 Chemische Eigenschaften

pH-Wert: Leinenfasern können einer Behandlung mit kalten verdünnten Säuren widerstehen. Sie haben auch eine hohe Beständigkeit gegenüber Laugen. Trotzdem können abgebaute, gealterte Fasern sehr empfindlich gegenüber den mildesten alkalischen oder sauren Behandlungen reagieren, besonders wenn sie schon photochemischem Abbau unterworfen waren.¹²⁸ Die Verwendung von Klebemitteln muss daher im Hinblick auf den pH-Wert dem Alter des textilen Trägers angepasst sein. Im Laufe der Alterung verschiebt sich der pH-Wert von Leinen in den sauren Bereich (bis pH 4),¹²⁹ Niedrige Werte (sauer) katalysieren zufällige Kettenbrüche, höhere Werte (basisch) verursachen Brüche an den Kettenenden, beides schädigt die schon durch den Riss belasteten Fasern noch mehr.¹³⁰

Emission: Die Emission schädigender Substanzen durch das Klebemittel sollte vermieden werden.

4.2.3 Verarbeitungseigenschaften

¹²¹ Der T_g gibt die Temperatur an, bei der ein Material von einem festen, glasartigen Zustand in einen weichen, elastischen Zustand übergeht. Beim Über- bzw. Unterschreiten des T_g ändern sich Eigenschaften wie Dehnbarkeit, Fließeigenschaften, Härte, Stoßfestigkeit, Klebrigkeit und Zugfestigkeit.

¹²² PLÖTZ 2002, S. 46.

¹²³ HORIE 1994, S. 78.

¹²⁴ BECKER 2002, S. 51.

¹²⁵ BERGER, RUSSELL 1993, S.115.

¹²⁶ FROMM 1991, S. 91.

¹²⁷ BRACHERT 1992, S. 332.

¹²⁸ TIMAR-BALASZY, EASTOP 1998, S. 36.

¹²⁹ HEDLEY 1993, S. 63.

¹³⁰ ROUX 1993, S. 54.

Applikation: Das Klebemittel sollte einfach zu applizieren sein, es sollte eine geringe Empfindlichkeit gegenüber Verarbeitungsfehlern aufweisen und die Abbindezeit bzw. Trockenzeit sollte von ausreichender Länge sein. Sie sollte

einerseits Gelegenheit geben, die Fügeile sorgsam miteinander zu verbinden und die Klebung zu modellieren, andererseits möglichst schnell soweit abbinden, dass die danebenliegenden Fäden bearbeitet werden können.

Viskosität: Die Viskosität des Klebstoffs sollte hoch genug sein, um ein unnötiges Eindringen in den Faden zu vermeiden. Sie sollte aber auch niedrig genug sein, um eine ausreichende Benetzung zu gewährleisten. Auch die Applizierbarkeit wird entscheidend von der Viskosität beeinflusst. Laut Young beinhaltet eine gute Benetzung einen gewissen Grad an Tränkung der Fadenenden.¹³¹

Mindestfilmbildungstemperatur (MFT): Die MFT bezeichnet die Temperatur, die eine Dispersion benötigt, um einen festen klaren Film beim Trocknen zu bilden, ist bei dem Einsatz der Heiznadel zum Trocknen in der Regel (bei einer Mindestfilmbildungstemperatur unter 40 °C) ohne Relevanz.

„Reversibilität“ / Wiederbearbeitbarkeit: Das Klebemittel sollte ohne Gefahr für die originale Substanz wieder entfernt werden können. Im Fall einer Rissverklebung ist diese Forderung allerdings kaum einzuhalten. Meist lässt sich die Klebung nicht mechanisch oder durch Wärme völlig entfernen, ohne die Fasern zu schädigen. Mit Lösungsmitteln kann das Klebemittel noch tiefer in die Fasern penetrieren. Eine einmal vollzogene Klebung ist somit irreversibel. Daher sollte eine möglichst uneingeschränkte Wiederbearbeitbarkeit angestrebt werden.¹³² Dabei muss die Lösungsmittelbeständigkeit der Fasern und der Bildschicht berücksichtigt werden.

Kompatibilität mit weiteren Maßnahmen: Bei der Auswahl des Klebstoffs sollten die weiteren geplanten Schritte berücksichtigt werden. Dabei ist vor allem die Kompatibilität mit Kittung und Retusche des Rissbereiches zu bedenken. Problematisch können auch geplante oder spätere Oberflächenreinigungen, Firnisabnahmen, Firnisaufräge, Festigung und Planierungen sein, wenn das Rissverklebungsmittel nicht wasser- oder lösemittelbeständig ist. Für eventuelle Doublierungen oder Malschichtfestigungen mit Wärme sollte auch die Temperaturbeständigkeit des Klebstoffs bedacht werden. Durch Lösemittel-, Wasser- und Temperatureinwirkung kann sich die Belastbarkeit der Rissverklebung reduzieren, selbst wenn das Klebemittel beständig erscheint.

4.2.4 Optische Eigenschaften

Die optischen Eigenschaften des Klebstoffs sind für eine Rissverklebung von untergeordneter Relevanz, sofern die Verklebung nicht auch von der Vorderseite des Gemäldes sichtbar ist, beispielsweise bei ungrundierter und teilweise unbemalter Leinwand. Auch der Kunsthandel verlangt zuweilen unberührt wirkende Rückseiten. Verfärbungen, Veränderungen in Tiefenlicht, Glanz und Oberflächenstruktur der Fasern sowie alterungsbedingte Vergilbungen sollten in diesen Fällen so weit wie möglich vermieden werden.

4.2.5 Alterungseigenschaften

Insgesamt gilt, dass alle geforderten Eigenschaften sich während der Alterung nicht verändern sollten.

4.3 Eigenschaften ausgewählter Materialien

In den Zugversuchen sollen zunächst möglichst viele für die Rissverklebung übliche Klebstoffe getestet werden. Die Auswahl wird teilweise in den einzelnen Kapiteln begründet, beruht jedoch hauptsächlich auf dem Anliegen, eine große

¹³¹ YOUNG 2003, S. 56.

¹³² Wiederbearbeitbarkeit bedeutet, dass der Riss im Falle eines Versagens wieder verklebt werden kann und dann noch die gleichen Möglichkeiten der Klebstoffauswahl bestehen wie vor der Verklebung.

Anzahl von in der Rissverklebung üblichen Klebstoffen zu vergleichen. Die Vorauswahl an in Frage kommenden Klebstoffen fiel auf folgende Produkte:

Störleim-Mischungen	Schmelzklebstoffe	Dispersionen	Epoxidharz
<ul style="list-style-type: none"> - Störleim-Weizenstärke - Störleim-Reisstärke - Störleim-JunFunori - Störleim-Aquazol - Störleim-Tylose - JunFunori-Weizenstärke - sowie die einzelnen Bestandteile dieser Mischungen 	<ul style="list-style-type: none"> - Beva 371 - Paraloid B72 - Degalan PQ611 - Polyamid 5065 (Lascaux) - Textilschweißpulver 5060 der Firma Kremer-Pigmente 	<ul style="list-style-type: none"> - Plectol B500 - Plectol D360 - Plectol D498 - Plectol D540 - Lascaux D498HV - Mowilith DMC2 - Mowilith DHS S1 - Mowilith LD167 - Mowilith D50 	UHU plus schnellfest

In den folgenden Kapiteln werden diese hinsichtlich ihrer material-spezifischen Eigenschaften näher beschrieben, insoweit diese von der sehr unterschiedlich ausfallenden Literaturlage dargestellt werden. Insgesamt ist der Forschungsstand zu den Klebstoffen äußerst inhomogen. So sind die Eigenschaften der verschiedenen Acrylate gut erforscht, während bei anderen Klebemitteln wie beispielsweise Tylose MH1000 keine spezifischen Ergebnisse verfügbar sind, so dass auf die Eigenschaften der Klebemittelgruppe Celluloseether zurückgegriffen werden musste. In dieser Arbeit soll von den zahlreichen Kriterien nur die Reaktion der Verklebungen auf kurzfristige Zugbelastungen überprüft werden.

4.3.1 Störleim

Störleim wird aus den Schwimmblasen des Störs gewonnen. Störleim zählt zu den Glutinleimen, die Kollagenhydrolyseprodukte sind. Sie werden hergestellt aus Kollagen, einem Skleroprotein (bestehend aus Aminosäuren, die über Peptidbindungen miteinander zu langen Ketten verbunden sind). Die durch Hydrolyse gelösten Molekülstränge lagern sich zu kugelförmigen Sphäroproteinen zusammen. Die Molmassenverteilung ist recht breit von niedrigen bis hochmolekularen Peptiden entsprechend des Abbaus durch hydrolytische Spaltung.¹³³ Das Molekulargewicht beträgt durchschnittlich 20.000 bis 40.000 g/mol. Unter einer Größe von 20.000 g/mol kann kein Film gebildet werden.¹³⁴

Störleim setzt sich wie folgt zusammen: 70% Glutin, 16% Osmazom, 7,5% Wasser, 4% Kali-, Natron- und Kalksalze, 2,5% unlösliche Hautanteile.¹³⁵ Die Zusammensetzung kann je nach Aufbereitung und Rohstoff variieren. In warmem Wasser ergibt sich eine kolloidale Lösung, die zum Kleben verwendet wird. Der pH-Wert der Lösungen liegt zwischen 5,3 und 7,0.¹³⁶ Am isoelektrischen Punkt von pH 4,5 verhält sich Störleim besonders stabil, da sich hier besonders viele ionische Bindungen bilden können.¹³⁷ Die Viskosität ist ebenfalls vom isoelektrischen Punkt abhängig, an dem sie am niedrigsten ist. Der Tg des Störleims variiert, je nachdem wie viel Wasser gebunden ist.¹³⁸

Für die Versuche in dieser Arbeit wird Störleim sowohl allein als auch in Mischung mit Stärkekleistern, Aquazol® 500, Celluloseethern und JunFunori® eingesetzt.

¹³³ HAUPT 2000, S. 48.

¹³⁴ MASSCHELEIN-KLEINER 1995, S. 57.

¹³⁵ HABEL-SCHABLITZKY 1992, S. 49. Osmazom ist ein veralteter und nicht mehr gebräuchlicher Begriff, der mehrere Substanzen umfasst (Kreatin, Kreatinin, Inosinsäure und Milchsäure). Leider konnten keine neueren Angaben zur genauen Zusammensetzung von Störleim in der Literatur gefunden werden.

¹³⁶ HABEL-SCHABLITZKY 1992, S. 75.

¹³⁷ Freundliche mündliche Mitteilung von Prof. Dr. Jägers, FH Köln.

¹³⁸ COERDT 2007, S. 34.

Adhäsion

Das Glutin in seiner amorphen Knäuelform enthält viele nach außen stehende Aminosäureenden mit vielfach funktionellen Gruppen, die Verbindungen sowohl zu anderen Glutininmolekülen als auch zur Kleboberfläche eingehen können. Die Klebkraft der Fischblasenleime wird von vielen Autoren, vor allem in geringen Konzentrationen, als sehr gut eingeschätzt.¹³⁹ Störleim hat unter den Glutinleimen aufgrund seines niedrigen Molekulargewichts einen vergleichsweise niedrigen Gelpunkt.¹⁴⁰ Entscheidend für die Rissverklebung ist, dass er dadurch auch in kleinsten Mengen vergleichsweise lange niedrigviskos bleibt und daher einen guten Kontakt zur Faseroberfläche herstellen kann. Bei zu niedrigen Temperaturen oder zu schnellem Gelieren käme es zu keiner guten Benetzung und Porenfüllung und damit zu keiner guten Adhäsion.

Andere Glutinleime wie Hautleim und Knochenleim sind aufgrund ihrer schnellen Gelbildung und damit schlechten Adhäsion für die Rissverklebung nicht geeignet.¹⁴¹

Kohäsion

Die Aminosäureketten der Glutine sind nach der Trocknung durch Wasserstoffbrücken verbunden. Dadurch sind sie hart, brüchig und unflexibel.

Ein Fließen der Moleküle unter Dauerbelastung ist somit nicht möglich.¹⁴² Störleim ist dabei jedoch flexibler und weicher als z.B. Gelatine, kann aber die gleichen Zugbelastungen aushalten.¹⁴³

Entscheidend für die Kohäsion kann die Temperatur sein, bei der die Leimlösung zu einem Film trocknet. Das langsame Gelieren knapp unterhalb der Geliertemperatur¹⁴⁴ begünstigt die Ausbildung eines hochgeordneten, teil-kristallinen Netzwerks.¹⁴⁵ Eine Erhöhung der Temperatur¹⁴⁶ kann dazu führen, dass die Moleküle nicht renaturieren können und weitgehend in ihrer amorphen Struktur bleiben. Diese Filme weisen eine deutlich geringere Zugfestigkeit und erhöhte Brüchigkeit gegenüber den ohne Wärmezufuhr getrockneten Filmen auf.¹⁴⁷

Durch den Zusatz von Füllstoffen werden Hohlräume aufgefüllt und eine ausreichend dicke Klebschicht für die Ausbildung optimaler Haftungskräfte geschaffen.¹⁴⁸

Reaktion auf Klimaschwankungen

Störleimfilme besitzen aufgrund ihrer Hygroskopizität auch in getrocknetem Zustand einen gewissen Wassergehalt, der sich in Abhängigkeit vom Umgebungsklima ändert. Die mechanischen Eigenschaften der Filme hängen stark von ihrem Feuchtigkeitsgehalt ab. Zumbühl führte Versuche zum Verhalten von Gelatine bei Klimaschwankungen durch, deren Ergebnisse sich mit hoher Wahrscheinlichkeit auch auf Störleimfilme übertragen lassen.¹⁴⁹ Er fand heraus, dass Gelatine auf Klimaschwankungen mit internen Spannungsänderungen reagiert. Unterhalb von 64% rF kommt es dabei durch die spezifische Wassereinlagerung zu Spannungsabnahme mit starker Verminderung der Zugfestigkeit. Überhalb von 65% rF gelangt der Tg an die Raumtemperatur und die Zugfestigkeit nimmt ab, während die Dehnbarkeit rapide zunimmt. Gleichzeitig schrumpfen die Filme durch fortschreitende Helixbildung unter feuchten Bedingungen. Es konkurrieren daher Kontraktionsreaktionen mit plastischen Relaxationsprozessen. Ab einer rF von 69% treten nach einer gewissen

¹³⁹ HABEL-SCHABLITZKY 1992, S. 90; PRZYBYLO 2006, S. 117.

¹⁴⁰ HAUPT 2000, S.44 Der Gelpunkt gibt die Temperatur an, bei der eine Gelbildung einsetzt.

¹⁴¹ Freundliche mündliche Mitteilung von Dipl. Rest. Petra Demuth, FH Köln.

¹⁴² MICHEL et al. 2002, S. 270.

¹⁴³ GEIGER, MICHEL 2005, S. 198.

¹⁴⁴ Die Geliertemperatur ist abhängig von den vorhandenen Moleküllängen. Diese können bei Störleim unterschiedlich sein. Im Durchschnitt liegt die Geliertemperatur unter 20-25 °C (HAUPT 2000, S. 97).

¹⁴⁵ HAUPT 2000, S. 97.

¹⁴⁶ laut ZUMBÜHL 2003, S. 96 über 50 °C; nach HAUPT 2000, S. 97 über 25 °C.

¹⁴⁷ HAUPT 2000, S. 40.

¹⁴⁸ PLÖTZ 2003, Teil 2, S. 7.

¹⁴⁹ ZUMBÜHL 2003, S. 97-102.

Zeit in der Summe Spannungszunahmen auf. Die Spannungen werden auf das umliegende Material übertragen. Die Gelatinefilme schrumpfen über mehrere Feuchtezyklen kontinuierlich weiter, da in Gelform eine Zunahme an Kristallinität stattfindet. Die Relaxationsfähigkeit nimmt gleichzeitig zunehmend ab, wodurch sich die Kapazität des Spannungsabbaus vermindert. Diese Reaktionen können aufgrund des ähnlichen chemischen Aufbaus auch bei Störleim erwartet werden.¹⁵⁰

Zusätzlich können durch Feuchtigkeitseinwirkungen Peptidbindungen hydrolysiert werden.¹⁵¹ Es kommt dadurch zu Kettenspaltungen und verringertem Molekulargewicht und somit auch zu verringerter Belastbarkeit. Trotz dieser Nachteile, die Störleim zunächst als ungeeignet für die Rissverklebung erscheinen lassen, wird als Vorteil angesehen, dass er als Glutinleim im Materialsystem der Gemälde bleibt. Glutinleim befindet sich häufig in der Vorleimung und teilweise auch in der Grundierung. Dabei ergeben sich vergleichbare Vorgänge bei Klimaschwankungen.

Löslichkeit / Reversibilität

Störleim bleibt nach dem Trocknen in kaltem Wasser quellbar und in warmem Wasser kolloidal löslich. Przybylo stellte fest, dass sich künstlich gealterte Störleimfilme nicht mehr vollständig in warmem Wasser lösen lassen.¹⁵² Störleim ist unlöslich in Öl, Wachs, organischen Lösungsmitteln und Alkohol.¹⁵³

Alterung

Störleim hat sich bei Langzeitstabilitätstests (UV-Strahlung und Klimaschwankungen) von Michel et al. optisch und auch in Bezug auf seine mechanischen Eigenschaften im Vergleich zu Funori, Celluloseethern und Gelatine am wenigsten verändert.¹⁵⁴ Sommermeyer kommt dagegen bei kombinierter Licht- und Klimaalterung zu dem Ergebnis, dass Störleim versprödet und an Filmstabilität verliert, während Methylcellulose (Methocel A4M von Dow Chemicals) weitgehend unverändert bleibt.¹⁵⁵ Getrockneter Störleim kann verspröden, wenn niedermolekulare Weichmacher wie Wasser, Fette und Glycerol aus dem Film diffundieren.¹⁵⁶ So stellten beispielsweise Geiger und Michel fest, dass Störleim während der Alterung etwas steifer wurde.¹⁵⁷ Versuche von Habel-Schablitzky zeigten jedoch, dass in vielen Fällen die Klebkraft durch die Alterung sogar zunahm.¹⁵⁸

Durch Spannungen (z.B. durch Feuchtigkeitswechsel) wird Glutinleim mechanisch abgebaut.¹⁵⁹ Während der Alterung können Glutinleime vergilben.

Der getrocknete Leim ist in Raumklima unanfällig gegenüber Mikroorganismenbefall.¹⁶⁰

4.3.2 Stärkekleister

Stärke ist ein natürliches Polymer, das aus Glucosemolekülen zusammen-gesetzt ist. Es besteht hauptsächlich aus Amylose (unverzweigte Ketten aus α -1,4-Glucose) und Amylopektin (buschartig verzweigte kurze Ketten aus α -1,6-Glucose).¹⁶¹ Durch Kochen der Stärke in Wasser kommt es durch Quellen und Aufplatzen der Stärkekörner zu einem

¹⁵⁰ Die Fakten des gesamten Abschnitts sind entnommen aus: ZUMBÜHL 2003.

¹⁵¹ MILLS, WHITE, 1987, S. 78.

¹⁵² PRZYBYLO 2007, S. 119.

¹⁵³ BRANDIS 1990, S. 127.

¹⁵⁴ MICHEL et al. 2002, S. 274.

¹⁵⁵ SOMMERMEYER 1998, S. 49.

¹⁵⁶ COERDT 2007, S. 35.

¹⁵⁷ GEIGER, MICHEL 2005, S. 198.

¹⁵⁸ HABEL-SCHABLITZKY 1992, S. 92.

¹⁵⁹ COERDT 2007, S. 35.

¹⁶⁰ Freundliche schriftliche Mitteilung von Birgit Wessel, FH Köln 1998, S. 13.

¹⁶¹ LISZEWSKA 2005, S. 24.

irreversiblen Verkleistern. Aufgrund der Herstellung des Kleisters mit demineralisiertem Wasser liegt der pH-Wert zwischen 6,5 bis 7,0.¹⁶²

Als Verdickungsmittel für Störleim wurden Weizen- und Reisstärke ausgewählt, da sie laut Springob in Mischung mit Störleim die höchste Klebkraft haben.¹⁶³

Adhäsion

Stärkekleister ist der am häufigsten eingesetzte Klebstoff in der Papierrestaurierung.¹⁶⁴ Daher kann eine gute Adhäsion auf cellulosehaltigem Material, beispielsweise auf Papier und Leinenfasern, angenommen werden. Auch aufgrund der zahlreichen Hydroxylgruppen haben Stärkekleister sehr gute Adhäsionseigenschaften auf polaren Substanzen wie Cellulose und Leinenfasern.¹⁶⁵

Kohäsion

Amylose trocknet aufgrund der geradlinigen, unverzweigten Molekülstruktur zu einem starren, festen und stabilen Film, während Amylopektin aufgrund der amorphen, verzweigten Struktur schwache, weiche und flexible Filme bildet.¹⁶⁶ Laut Gill sind getrocknete Kleister aus Reisstärke weniger steif als solche aus Weizenstärke.¹⁶⁷

Reaktion auf Klimaschwankungen

Kleister ist ein hygrokopisches Material, das stark auf Feuchtigkeit reagiert. Das absorbierte Wasser verursacht eine Quellung und damit eine Dimensionsänderung.¹⁶⁸ Bei hoher Feuchtigkeit ist er anfällig gegen Schimmel und Insekten.

Löslichkeit / Reversibilität

Getrocknete Weizen- und Reisstärkefilme quellen in kaltem Wasser, sodass die Verbindungen wieder gelöst werden können. Da getrockneter Stärkekleister selbst erst ab Temperaturen von fast 100 °C löslich ist, verbleiben bei der Lösung mit kälterem Wasser Stärkereste an den Fasern. Amylaseenzyme können die Stärkereste vollständig entfernen.¹⁶⁹

Alterung

Amylose altert durch Hydrolyse und Photooxidation mit Kettenbrüchen.¹⁷⁰ Daher wäre eine Abnahme der Kohäsion anzunehmen. Als Polysaccharid kann Stärke unter feuchten Bedingungen Nahrung für zahlreiche Pilze und Bakterien sein.¹⁷¹ Mikrobieller Befall wird jedoch lediglich bei sehr feuchtem Klima zu erwarten sein.¹⁷² Der pH-Wert ändert sich durch künstliche Alterung nicht wesentlich.¹⁷³

¹⁶² Im Rahmen dieser Arbeit mit pH-Messpapieren getestet.

¹⁶³ SPRINGOB 2001, S. 126.

¹⁶⁴ Freundliche mündliche Mitteilung von Dipl. Rest. Verena Grande, Frankfurt.

¹⁶⁵ KRUGER, LACOURSE 1990, S. 153; TIMAR-BALASZY, EASTOP 1998, S. 123.

¹⁶⁶ HORIE 1994, S. 135f.

¹⁶⁷ GILL 1994, S. 44.

¹⁶⁸ WORCH 2006, S. 28.

¹⁶⁹ DANIELS 1995, S. 75.

¹⁷⁰ HORIE 1994, S. 136.

¹⁷¹ TIMAR-BALASZY, EASTOP 1998, S. 123.

¹⁷² SPRINGOB 2001, S. 121.

¹⁷³ LISZEWSKA 2005, S. 28.

Eigenschaften in Mischung mit Störleim

Durch die Zugabe von Stärkekleister erhöht sich die Viskosität von Störleim, gleichzeitig werden die Fließfähigkeit und die Eindringtiefe ins Gewebe verringert und eine partielle Tränkung verhindert.¹⁷⁴ Weizenstärkekleister ist ein häufig verwendetes Verdickungsmittel für Störleim für die Rissverklebung.¹⁷⁵ Springob beschreibt, dass Weizenstärkekleister eine geringere Eigenspannung beim Trocknen und bei gleichem Feststoffgehalt eine höhere Viskosität als Reisstärkekleister hat. Trotzdem muss Weizenstärkekleister in höherer Konzentration dem Störleim zugegeben werden, um ein Eindringen in die Leinenfasern zu vermeiden. Reisstärkekleister ist dagegen besser homogen mit Störleim mischbar und verhindert somit eine Entmischung und das tiefe Eindringen des Leims in die Leinenfasern.¹⁷⁶ Er ist zugleich niedrigviskoser als Weizenstärkekleister. Dadurch können dünnere Klebeschichten und ein besseres Eindringen der Mischung in feine Hohlräume erwartet werden.¹⁷⁷

Hofmann beschreibt, dass sich Weizenstärke-Störleim-Mischungen schon am Tag der Herstellung entmischen, daher immer entweder mehr Störleim oder mehr Stärkekleister aufgebracht wird und ein Abwandern des Störleims aus der Mischung in die Fasern mit Randbildung beobachtet werden konnte.¹⁷⁸

In Störleim-Kleister-Mischungen ist der Leim der Hauptträger der Adhäsion. Der Kleister fungiert in erster Linie als Füllmittel und erst in zweiter Linie als Klebemittel. Er füllt die Hohlräume zwischen den Fasern auf und vergrößert damit die Klebefläche. Nach Untersuchungen von Springob haben Mischungen von Störleim mit Weizen- und Reisstärken die höchste Klebkraft. Sie wird größer, je stärker der Klebstoff in die Fäden eindringt und sich dort verankert.¹⁷⁹

Laut Ackroyd ist es möglich, dass der Störleim als proteinhaltiges Material eine chemische Reaktion mit der Stärke eingehen und damit deren Degradation beschleunigen könnte.¹⁸⁰

Springob beobachtete während der Alterung jedoch keine Veränderungen in der Klebkraft der Leim-Kleister-Mischungen.¹⁸¹ Vermutlich ist das Nachlassen der Kohäsion des Füllstoffs nicht ausschlaggebend für die Kohäsion der Mischung. Nägler gibt aber an, dass die Klebstoffmischung im Lauf der Zeit verspröden und vergilben kann.¹⁸²

Beim Trocknen der Störleim-Kleister-Mischung kommt es zu Spannungen, für die vor allem der Störleim ausschlaggebend ist; der Kleister verringert in der Mischung dessen Spannung.¹⁸³

Üblicherweise wird für die Rissverklebung eine Mischung aus 20%igem Störleim und 10%igem Weizenstärkekleister 1:1 verwendet.¹⁸⁴ Die Mischung muss immer warm gehalten werden (40-50 °C), und zwar in einem geschlossenen Behälter, damit sich die Konzentration nicht ändert. Die Mischung sollte jeden Tag neu angesetzt werden, da Störleim sich im Kühlschrank gut hält, Stärkekleister dagegen luftdicht in einer Spritze aufgezogen bei Raumtemperatur aufbewahrt werden sollten.¹⁸⁵

¹⁷⁴ SPRINGOB 2001, S. 111.

¹⁷⁵ HEIBER 1996, HEIBER 2003.

¹⁷⁶ SPRINGOB 2001, S. 126.

¹⁷⁷ SPRINGOB 2001, S. 126.

¹⁷⁸ HOFMANN 2003, S. 44f.

¹⁷⁹ SPRINGOB 2001, S. 126.

¹⁸⁰ ACKROYD 1995, S. 87.

¹⁸¹ SPRINGOB 2001, S. 126.

¹⁸² NÄGLER 2005, S. 103.

¹⁸³ ACKROYD 1995, S. 84.

¹⁸⁴ Freundliche mündliche Mitteilung von Dipl. Rest. Petra Demuth, FH Köln.

¹⁸⁵ Bei Lagerung im Kühlschrank kommt es zur Retrogradation des Kleisters (Rückbildung in wasserunlösliche Form durch Kristallisation).

4.3.3 JunFunori®

JunFunori® ist eine standardisierte und gereinigte Form des pflanzlichen Klebstoffs Funori.¹⁸⁶ Es handelt sich um ein Gemisch wasserlöslicher sulfonierter Polysaccharidstrukturen, das aus der Rotalge *Gloiopeltis furcata* extrahiert wird.¹⁸⁷ Ursprünglich wurde es speziell für die Festigung pudernder Malschichten entwickelt, wird jedoch auch als Verdickungsmittel für Störleim empfohlen.¹⁸⁸ Schon bei 1%iger Konzentration entsteht eine hochviskose kolloidale Lösung.¹⁸⁹ Diese verhindert aufgrund der hohen Viskosität die Tränkung von Pigmentagglomeraten, und möglicherweise auch von Leinenfäden.¹⁹⁰

JunFunori®-Filme haben sehr gute optische Eigenschaften, sie verändern das Aussehen von verklebten oder gefestigten Bereichen nicht oder nur kaum.¹⁹¹

Da der pH-Wert von JunFunori® in der Literatur nicht thematisiert wird, soll an dieser Stelle ergänzend der pH-Wert von Funori-Lösungen erwähnt werden. Er wird mit 6,2-7,5¹⁹² bzw. 7,0-7,8¹⁹³ angegeben. Es ist anzunehmen, dass der pH-Wert von JunFunori ebenfalls in diesem Bereich anzusiedeln ist.

Adhäsion

Die Klebkraft ist eher gering, sie liegt zwischen Klucel E und Gelatine.¹⁹⁴ JunFunori® hat zwar eine etwas stärkere Klebkraft als Funori, ist aber immer noch ein vergleichsweise schwacher Klebstoff.¹⁹⁵

Kohäsion

JunFunori® ist ebenso wie Glutinleim eher spröde und schlecht dehnbar. Durch die kristalline Struktur, die sich durch die zahlreichen Wasserstoffbrückenbindungen ergibt, wird ein Fließen der Moleküle verhindert. JunFunori® kann jedoch etwas höheren Belastungen widerstehen.¹⁹⁶

Reaktion auf Klimaschwankungen

Die Reaktion der getrockneten Filme auf Feuchteschwankungen verläuft wesentlich schneller und mit stärkerer Volumenänderung als bei Glutinleimen.¹⁹⁷

Löslichkeit / Reversibilität

JunFunori® ist sehr gut löslich in Wasser. Unlöslich ist es in Benzinen, Ketonen und Aromaten. Durch Alkohole wird Schrumpfen mit Spannungsbildung ausgelöst.¹⁹⁸ Zur Reversibilität finden sich in der Literatur keine Aussagen.

¹⁸⁶ Exklusiver Vertrieb durch die Firma Lascaux seit 2001. Funori kann auch verwendet werden, ist aber ein Naturprodukt und daher in schwankender Qualität erhältlich. Aufgrund der Reproduzierbarkeit der Messergebnisse soll daher in dieser Arbeit die standardisierte Form JunFunori® verwendet werden.

¹⁸⁷ LASCAUX <www.lascaux.ch> (15.01.2008) s. JunFunori.

¹⁸⁸ LASCAUX <www.lascaux.ch> (15.01.2008) s. JunFunori; MICHEL et al. 2002, S. 267f.

¹⁸⁹ Eine 1%ige JunFunori®-Lösung hat eine Viskosität von 4,51 Pa*s (Messung mit einem Rotationsviskosimeter). Die Viskosität einer 0,5%igen Lösung ist um ein vielfaches geringer (Freundliche mündliche Mitteilung von Ina Hausmann, Köln 2005, S.11 und S. 35).

¹⁹⁰ KREMER <www.kremer-pigmente.de> (15.012008) s. Funori.

¹⁹¹ MICHEL et al. 2002; LASCAUX <www.lascaux.ch> (15.01.2008) s. JunFunori.

¹⁹² MICHEL et al. 2002, S. 265.

¹⁹³ Neutraler Bereich mit leichter Tendenz zum Basischen. Freundliche schriftliche Mitteilung von Marion Korb, FH Köln 1995, S. 19.

¹⁹⁴ GEIGER, MICHEL 2005, S. 196.

¹⁹⁵ MICHEL et al. 2006, S. 322.

¹⁹⁶ GEIGER, MICHEL 2005 S. 198

¹⁹⁷ Freundliche schriftliche Mitteilung von Marion Korb, FH Köln 1995, S. 21f.

¹⁹⁸ Freundliche schriftliche Mitteilung von Marion Korb, FH Köln 1995, S. 27.

Alterung

Die Ergebnisse der künstlichen Alterungstests lassen keine Änderungen der Zugbelastbarkeit oder der chemischen Struktur erkennen. Während der künstlichen Alterung mit UV-Bestrahlung und Klimawechseln kommt es zu einem Ausbleichen der JunFunori®- Filme.¹⁹⁹ Sie werden zudem weicher und flexibler, möglicherweise aufgrund absorbierten Wassers.²⁰⁰ Infrarotspektren vor und nach der künstlichen Alterung zeigten keine signifikanten Unterschiede. Dies ist ein Anzeichen dafür, dass keine Änderungen der molekularen Struktur während der künstlichen Alterung stattgefunden haben.²⁰¹ Auch unter Zugbelastung änderte sich das Verhalten des gealterten Materials kaum.²⁰²

Die Anfälligkeit für Mikroorganismen ist nicht höher als bei Glutinleimen oder Celluloseethern.²⁰³

Aufgrund der wenigen Alterungsstudien an JunFunori® sollen hier auch einige Beobachtungen an Funori erwähnt werden: Laut Korb ändert sich der pH-Wert von Funori-Lösungen während einjähriger Lagerung in Lösung nicht, auch eine Vergilbung war nicht festzustellen.²⁰⁴ Jahrzehntelange Erfahrungen von Restauratoren mit Funori-Festigungen zeigen, dass kein Bindungsversagen oder Farbveränderungen zu erwarten sind.²⁰⁵

Aufgrund des hohen Sulfatanteils kann vermutet werden, dass es im Verlauf der Alterung zu sauren Abspaltungen kommen könnte, jedoch gibt es hierfür keinen Nachweis.²⁰⁶

Eigenschaften in Mischung mit Störleim

In Mischung mit Störleim erhöht sich die Klebkraft von JunFunori®, außerdem wird das Eindringverhalten verbessert. JunFunori® wirkt als Verdicker und verhindert so, dass der Störleim in die Fasern abfließt. Es soll auch die Randbildung oder ein Verdunkeln durch den Störleim verhindern können.²⁰⁷ Hofmann berichtet, dass in Mischung mit Störleim eine homogene Mischung entsteht, und die Heiznadel nicht an den Fasern kleben bleibt wie bei einer Störleim-Weizenstärkekleister-Mischung.²⁰⁸

In Fällen, in denen die Rissverklebung sich in einem für den Betrachter des Kunstwerks sichtbaren Bereich befindet, wird die JunFunori® -Störleim Mischung aufgrund der geringen Verfärbung und Tiefenlichtveränderung der verklebten Fasern verwendet.²⁰⁹

¹⁹⁹ GEIGER, MICHEL 2005 S. 196.

²⁰⁰ GEIGER, MICHEL 2005 S. 198.

²⁰¹ GEIGER, MICHEL 2005 S. 200f.

²⁰² GEIGER, MICHEL 2005 S. 198.

²⁰³ MICHEL et al. 2002, S. 272f; GEIGER, MICHEL 2005, S. 201.

²⁰⁴ Freundliche schriftliche Mitteilung von Marion Korb, FH Köln 1995, S. 14 und S. 19 (1 Jahr in Lösung im Kühlschrank aufbewahrt).

²⁰⁵ SWIDER, SMITH 2005, S. 123.

²⁰⁶ Freundliche schriftliche Mitteilung von Marion Korb, FH Köln 1995, S. 34.

²⁰⁷ LASCAUX <www.lascaux.ch> (15.01.2008) s. JunFunori.

²⁰⁸ HOFMANN 2003, S. 45.

²⁰⁹ Freundliche mündliche Mitteilung von Dipl. Rest. Petra Demuth, FH Köln.

4.3.4 Aquazol 500®

Aquazol ist der Handelsname für Poly-2-ethyl-2-oxazolin (abgekürzt PEOX). Es handelt sich um ein Polymerisationsprodukt von 2-ethyl-2-oxazolin mit der Summenformel $-(H_5H_9NO)_n$.²¹⁰

Aquazol® dient in dieser Arbeit zur Modifikation von Störleimlösungen. Es erhöht deren Viskosität und kann gleichzeitig selbst als Klebstoff eingesetzt werden, so dass die Klebkraft nicht übermäßig abnimmt. Der ausgewählte Typ Aquazol® 500 hat ein Molekulargewicht von 500.000 g/mol. Er weist von allen Aquazoltypen die höchste Viskosität und die höchste Klebkraft auf und ist daher als Verdickungsmittel für Störleim am besten geeignet.²¹¹ Für die Rissverklebung wurde eine den Störleim-Kleister-Mischungen ähnliche Viskosität angestrebt, die bei einer Konzentration von 25% erreicht wurde.

Adhäsion

Aufgrund der Kompatibilität von Aquazol® mit vielen anderen Polymeren wird eine sehr gute Haftung des Polymers auf den unterschiedlichsten Oberflächen, wie z.B. Wachs und verschmutzten Oberflächen, möglich.²¹² In der Industrie wird Aquazol sogar als Haftungsvermittler eingesetzt.²¹³ Nach Untersuchungen von Arslanoglu ist die Adhäsion von Aquazol® vergleichbar mit Glutinleimen.²¹⁴

Kohäsion

Aufgrund von Zugtests von Wolbers et al. erscheint Aquazol® als ein schwaches Klebemittel.²¹⁵ Im Vergleich zu den anderen Aquazoltypen hat Aquazol® 500 die höchste Klebkraft.²¹⁶

Zugbelastbarkeit und Elastizität von Aquazol sind direkt abhängig vom Klima. Da Aquazol® wasserlöslich ist, nimmt seine mechanische Stärke durch Wasserabsorption ab.²¹⁷ Je höher die relative Feuchte ist, desto geringeren Zugbelastungen hält das Material stand und desto größer ist die Dehnung am Bruchpunkt. Trotz großer Schwankungen in den Messwerten kann es insgesamt nur geringen Zugbelastungen standhalten und ist ein außerordentlich plastisches Material. Bei Standardklima (70 °F, 55% rF) sind Glutinleime brüchiger als Aquazol®.²¹⁸ Die Zugbelastungen zeigen, dass Aquazol® 500 selbst bei sehr niedriger relativer Feuchte noch sehr gut verformbar ist.²¹⁹

Von Vorteil ist das geringe Schrumpfen und damit das Fehlen von Eigenspannungen bei Aquazol® beim Trocknen (im Gegensatz etwa zu Störleim und Gelatine).²²⁰

Reaktion auf Klimaschwankungen

Im Vergleich zu Glutinleimen reagieren PEOX zwar langsamer auf Klimaschwankungen, absorbieren aber insgesamt mehr Wasser als Störleim,

Gelatine oder PVAI, jedoch weniger als Gummi arabicum.²²¹ Diese Eigenschaft kann bei hoher rF (über 84%) zu einem Verlust der Klebkraft und „gelieren“ von Aquazol führen. Je höher die relative Feuchte ist, desto geringeren

²¹⁰ WOLBERS et al. 1998.

²¹¹ WOLBERS et al. 1998, S. 525.

²¹² ARSLANOGLU 2003, S. 12.

²¹³ CHIU et al. 1986, S. 432.

²¹⁴ ARSLANOGLU 2003, S. 17.

²¹⁵ WOLBERS et al. 1998, S. 526.

²¹⁶ WOLBERS et al. 1998, S. 525.

²¹⁷ WOLBERS et al. 1998, S. 523.

²¹⁸ ARSLANOGLU 2003, S. 13.

²¹⁹ WOLBERS et al. 1998, S. 526.

²²⁰ ARSLANOGLU 2003, S. 15.

²²¹ ARSLANOGLU 2004, S. 14

Zugbelastungen hält Aquazol® 500 stand und desto größer ist die Dehnung am Bruchpunkt. Das Material wird also bei steigender Feuchtigkeit weicher und leichter verformbar.²²² Dies sollte bei Verwendung in unstabilem Klima beachtet werden, besonders, da ab etwa 80% rF Gemäldebildträger durch das Quellen der Fasern eine höhere Spannung bekommen.²²³

Aquazol® verfügt über eine außergewöhnlich gute thermische Stabilität, wobei erste Degradationserscheinungen erst ab 380 °C auftreten.²²⁴

Vor einer Anwendung sollten die späteren Klimabedingungen bedacht werden. Bei rF unter 75% gibt es keine signifikante Abnahme der Adhäsion. Über 84% rF geliert Aquazol® und die Adhäsion lässt nach.²²⁵

Löslichkeit / Reversibilität

Aquazol® ist sehr gut in Wasser und fast allen polaren und mittelpolaren organischen Lösungsmitteln wie z.B. Alkoholen und Ketonen löslich. In aliphatischen Benzinen ist es unlöslich, in aromatischen dagegen teilweise löslich.²²⁶ Wasser ist ein schlechterer Löser als Aceton, deshalb ergeben sich in Wasser hochviskosere Lösungen und Aquazol® löst sich etwas langsamer.²²⁷ Mit Aquazol verklebte Fäden können jederzeit mit anderen Klebstoffen wiederverarbeitet werden, falls die Klebung sich als ungenügend erweisen sollte.²²⁸

Alterung

Der einzige Alterungstest wurde von Wolbers et al. durchgeführt, dabei wurde nur die Alterung unter Lichteinfluss überprüft.²²⁹ Die Filme veränderten sich dabei durch Lichtalterung nicht.²³⁰ Es konnte keine Farbänderung festgestellt werden. Auch an FTIR-Spektren konnten kaum Veränderungen beobachtet werden, was bedeutet, dass keine Oxidation oder andere größere Abbauprozesse stattgefunden haben.²³¹ Der pH-Wert verringerte sich nur minimal (von 6,4 +/-0,1 auf 6,2 +/-0,1).²³² Die Löslichkeit von Aquazol® veränderte sich während der Alterung nicht.²³³ Als einzige Veränderung wurde festgestellt, dass das Molekulargewicht während der Alterung durch Kettenspaltung abnimmt.²³⁴ Das Material wird dabei noch leichter löslich. Gleichzeitig nehmen auch Klebkraft und Zugbeständigkeit ab. Ungeklärt ist, ob Aquazol® bei längerer Alterung weiter an Klebkraft einbüßt.

Die durchgeführten Tests entsprechen einer natürlichen Alterung von etwa 24 Jahren,²³⁵ was für eine Verwendung in der Restaurierung nicht ausreichend ist. Da nur die Lichtalterung getestet wurde, ist fraglich, ob die Alterung bei einer Rissverklebung an der lichtabgewandten Gemälderückseite ähnlich verläuft.

Trotz der geringen Erfahrungen kann Aquazol® für die Rissverklebung angewendet werden, da mit der Alterung in erster Linie eine bessere Löslichkeit einhergeht und die Reversibilität somit gewährleistet ist.

²²² WOLBERS et al. 1998, S. 521; ARSLANOGLU 2003, S. 12.

²²³ HEDLEY 1993, S.114.

²²⁴ CHIU et al. 1986, S. 427f.

²²⁵ ARSLANOGLU 2003, S. 18.

²²⁶ CHIU et al. 1986, S. 425, S. 430; Freundliche schriftliche Mitteilung von Dipl. Rest. Christine Fröhner, Köln 2006, S. 45f.

²²⁷ WOLBERS et al. 1998, S. 523; ARSLANOGLU 2003, S.18.

²²⁸ ARSLANOGLU 2004, S. 11.

²²⁹ WOLBERS et al. 1998, S. 514-527.

²³⁰ WOLBERS et al. 1998, S. 520.

²³¹ WOLBERS et al. 1998, S. 521

²³² WOLBERS et al. 1998 S. 517.

²³³ WOLBERS et al. 1998, S. 523.

²³⁴ WOLBERS et al. 1998, S. 522 und S. 526.

²³⁵ WOLBERS et al. 1998, S. 516.

Weitere Eigenschaften

Laut Produktdatenblatt des Herstellers reagiert Aquazol® in wässriger Lösung pH-neutral.²³⁶ Wolbers et al. stellten einen pH-Wert von 6,4 fest.²³⁷

Der Glasübergangspunkt von Aquazol® liegt bei 69-71 °C, der Erweichungsbereich zwischen 110-120 °C.²³⁸

Aquazol 500® erzeugt schnell einen recht hohen Glanz durch Sättigung der Fasern.²³⁹

Nach einem Tag Trocknung kommt es nur noch zu minimalem Gewichtsverlust, nach 10 Tagen ist jedoch immer noch ein kleiner Anteil Wasser im Film enthalten.²⁴⁰ So lange sollte die Verklebung möglichst keinen Spannungen ausgesetzt werden.

Eigenschaften in Mischung mit Störleim

Zu den Eigenschaften in Mischung mit Störleim ist noch nichts bekannt oder publiziert.

4.3.5 Celluloseether

Celluloseether sind Cellulosederivate, die durch Substitution der Wasserstoffatome der Hydroxylgruppen der Cellulose hergestellt werden. Es gibt einfache Ether und Mischether, bei denen die Cellulose mit zwei oder mehreren Substituenten (Alkyl-, Hydroalkyl-, Carboxyalkyl- oder Aralkylgruppen) umgesetzt wird. Die Anzahl der Substituenten an jeder Glucoseeinheit wird mit dem Substitutionsgrad (DS) gekennzeichnet. Es gibt Celluloseether sowohl in wasserlöslicher Form (Methylcellulose MC, Hydroxypropylmethylcellulose HPMC, Hydroxypropylcellulose HPC, Hydroxyethylcellulose HEC, Ethylhydroxyethylcellulose EHEC, Natrium-Carboxymethylcellulose CMC) als auch in organischen Lösungsmitteln löslicher Form (Ethylhydroxyethylcellulose EHEC, Ethylcellulose EC).²⁴¹ Sie sind in verschiedenen Viskositätsgraden erhältlich. Aufgrund der Vielzahl von Celluloseethern mit variierenden Eigenschaften kann hier nur ein kursorischer Überblick gegeben werden.

MC	Methylcellulose
HPMC	Hydroxypropylmethylcellulose
HPC	Hydroxypropylcellulose
HEC	Hydroxyethylcellulose
EHEC	Ethylhydroxyethylcellulose
CMC	Natrium-Carboxymethylcellulose
EC	Ethylcellulose

Tab. 2: Abkürzungen verschiedener Celluloseether

Für die Rissverklebung ausgewählt

In der HfAK Wien wird als Verdickungsmittel für Störleim die Methylhydroxyethylcellulose (MHEC) Tylose MH1000 verwendet.²⁴² Deshalb wurde es in die Tests mit einbezogen. Da dieser Celluloseethertyp in der Literatur nicht weiter

²³⁶ POLYCHEMISTRY <www.polychemistry.com> (16.01.2008) s. Aquazol 500.

²³⁷ WOLBERS 1998, S. 517; POLYCHEMISTRY <www.polychemistry.com> (16.01.2008).

²³⁸ CHIU et al. 1986, S. 427; POLYCHEMISTRY <www.polychemistry.com> (16.01.2008).

²³⁹ ARSLANOGLU 2004, S. 15.

²⁴⁰ ARSLANOGLU 2003, S. 17 und S. 13.

²⁴¹ OESS 1995, S. 63.

²⁴² WUNTSCHEK 1997, S. 13.

thematisiert wird, soll hier auf die Eigenschaften der gesamten Gruppe der Celluloseether eingegangen werden. Am ehesten entspricht er der Gruppe der Hydroxyethylcellulosen (HEC).

Aufgrund des geringen Bindevermögens und der geringen Klebkraft,²⁴³ sowie der geringen Langzeitbeständigkeit der HEC,²⁴⁴ können andere Celluloseether als Modifizierungsmittel für Störleim zweckentsprechender sein.²⁴⁵ Am geeignetsten sind vermutlich langkettige Methylcellulosen (MC), da sie zu den Celluloseethern mit der höchsten Klebkraft gehören und das hohe Molekulargewicht auf gute Verdickungseigenschaften schließen lässt. Da häufig Verunreinigungen in den technischen Produkten auftreten, ist die Verwendung von Produkten mit dem Namenszusatz F (food grade) oder P (pharmaceutical grade) empfehlenswert.²⁴⁶

Adhäsion

Wasserlösliche Celluloseether bilden eine gute Haftung zu verschiedenen Untergründen aus.²⁴⁷ Aufgrund der polaren Struktur kann eine gute Haftung auf polaren Materialien angenommen werden.

Kohäsion

Celluloseether bilden transparente elastische Filme mit hohem Pigmentbindevermögen. Laut Oess gilt HEC als der beste Filmbildner, es folgen HPC und MC-Mischether, MC hat die schlechtesten Filmbildungseigenschaften. Hingegen steigen Bindevermögen und Klebkraft in umgekehrter Reihenfolge.²⁴⁸ CMC bildet im Vergleich zu den anderen Celluloseethern relativ harte und steife Filme, die eine gute Zugfestigkeit besitzen.²⁴⁹ Mit steigendem Molekulargewicht steigt bei allen Celluloseethern die Zugfestigkeit, Dehnbarkeit und Flexibilität der Filme.²⁵⁰ Die Viskosität von Tylose MH1000 ist mit 1000 mPa*s vergleichsweise hoch, daher kann auch ein hohes Molekulargewicht angenommen werden.²⁵¹

Reaktion auf Klimaschwankungen

Celluloseether sind hygroskopisch. Bei hohen relativen Feuchten können die Filme klebrig werden.²⁵² Die Haftung sowie die Kohäsion nehmen dadurch beträchtlich ab. Mit dem Substitutionsgrad steigt im Allgemeinen die Fähigkeit zur Wasseraufnahme.²⁵³ CMC nimmt aufgrund ihres ionischen Charakters besonders viel Feuchtigkeit auf.²⁵⁴

Löslichkeit / Reversibilität

Die Wasserlöslichkeit der Celluloseether hängt einerseits vom Molekulargewicht ab, andererseits vom Substitutionsgrad. Laut Feller und Wilt sind die Polymere bis zu einem DS von 0.1 in verdünnten Basen löslich, dann gehen sie in eine wasserlösliche Form über (etwa DS 1.0-2.3). Bei einem hohen Substitutionsgrad (DS 2.3-3.0) sind sie

²⁴³ OESS 1995, S. 43.

²⁴⁴ FELLER, WILT 1990, S. 93.

²⁴⁵ Aus Zeitgründen konnte ein Versuch zur Eignung verschiedener Celluloseether und zur Ermittlung einer angemessenen Konzentration nicht in diese Arbeit mit aufgenommen werden. Getestet wurden nur bisher für die Rissverklebung empfohlene Klebstoffkombinationen.

²⁴⁶ OESS 1995, S. 69

²⁴⁷ OESS 1995, S. 45.

²⁴⁸ OESS 1995, S. 43.

²⁴⁹ OESS 1995, S. 48.

²⁵⁰ HORIE 1994, S. 129.

²⁵¹ Im Produkt- und Sicherheitsdatenblatt ist die Molekülgröße nicht enthalten, schriftliche Anfragen wurden nicht beantwortet.

²⁵² FELLER, WILT 1990, S. 27.

²⁵³ OESS 1995, S. 48.

²⁵⁴ FELLER, WILT 1990, S. 27.

auch in organischen Lösungsmitteln löslich.²⁵⁵ Solche hohen Substitutionsgrade sind jedoch selten. Der Substitutionsgrad von Tylose MH1000 wird nicht angegeben,²⁵⁶ das Pulver ist jedoch wasserlöslich.

Viele wasserlösliche Celluloseether haben ein umgekehrtes Temperatur-Löslichkeitsverhalten. Sie sind bei niedrigen Temperaturen oder Raumtemperatur löslich und bei höheren Temperaturen unlöslich.²⁵⁷ So wird z.B. MC ab etwa 55 °C unlöslich und fällt aus. CMC ist dagegen sowohl in kaltem als auch in heißem Wasser löslich.²⁵⁸

Nach der Filmbildung können Celluloseether durch Wasser bzw. Lösungsmittel wieder angelöst werden.

Alterung

Celluloseether können durch Hitze, Licht und Enzyme abgebaut werden.²⁵⁹ Auch erhöhter Säure- oder Basengehalt kann zu Kettenbrüchen führen.²⁶⁰ Im Allgemeinen ist die Stabilität vom Substitutionsgrad abhängig. Je vollständiger die OH-Gruppen substituiert sind, desto eher neigt der Ether zu Degradationserscheinungen.²⁶¹ Laut Feller und Wilt fallen die Alterungseigenschaften bzw. die Beständigkeit der Celluloseether in derselben chemischen Klasse teilweise sehr unterschiedlich aus, so dass jedes Produkt einzeln untersucht werden müsste.²⁶² Sie gehen jedoch davon aus, dass lösungsmittellösliche Ether wie EC und EHEC sowie die wasserlösliche HEC nicht langzeitbeständig sind, da bei thermischer Alterung die Viskosität abnimmt, Peroxide gebildet werden und Verfärbungen entstehen.²⁶³ Auch HPC (Klucel) ist nur bedingt beständig (es kommt zu Kettenbrüchen und Gewichtsverlusten), wobei die hochmolekularen Typen M und H weniger stabil als die niedrigmolekularen Typen G und L sind.²⁶⁴ Eine ausgezeichnete Stabilität haben dagegen MC und HPMC. Auch CMC hat eine sehr hohe Stabilität, wird jedoch unter MC eingeordnet.²⁶⁵ Horie gibt dagegen an, dass CMC weniger beständig sei als Stärke.²⁶⁶ Aufgrund des hohen Natrium-Anteils ist CMC beständig gegenüber mikrobiellem Befall.²⁶⁷ Oess unterteilt die Celluloseether in ihrer Beständigkeit wie folgt: MC, OS-MC, HEMC, HPMC > CMC, WS-EHEC > HEC > HPC > EC.²⁶⁸

Eigenschaften in Mischung mit Störleim

In Lösungen wirken Celluloseether allgemein viskositätserhöhend.²⁶⁹ Daher können sie die Viskosität der Mischung erhöhen und das Eindringen vermindern. Gleichzeitig wird die Klebkraft des Störleims herabgesetzt. Mit Celluloseethern verdickte Störleimlösungen zeigen eine deutlich verringerte Eindringtiefe, im Randbereich kommt es jedoch aufgrund der schnellen Entmischung zu einer Störleimkonzentration.²⁷⁰

²⁵⁵ FELLER, WILT 1990, S. 20.

²⁵⁶ Im Produkt- und Sicherheitsdatenblatt sind diese Informationen nicht enthalten, schriftliche Anfragen wurden nicht beantwortet.

²⁵⁷ FELLER, WILT 1990, S. 29.

²⁵⁸ FELLER, WILT 1990, S. 110.

²⁵⁹ FELLER, WILT 1990, S. 22.

²⁶⁰ FELLER, WILT 1990, S. 32.

²⁶¹ OESS 1995, S. 67.

²⁶² FELLER, WILT 1990, S. 95.

²⁶³ FELLER, WILT 1990, S. 93.

²⁶⁴ FELLER, WILT 1990, S. 94.

²⁶⁵ FELLER, WILT 1990, S. 95.

²⁶⁶ HORIE 1994, S. 126.

²⁶⁷ FELLER, WILT 1990, S. 111.

²⁶⁸ OESS 1995, S. 63.

²⁶⁹ HORIE 1994, S. 129; FELLER, WILT 1990, S. 108-111.

²⁷⁰ SPRINGOB 2001, S. 123f.

4.3.6 Polyvinylacetate (PVAC)

Polyvinylacetate sind Polymerisate aus Vinylacetaten [Summenformel: $-\text{CH}(\text{O}-\text{CO}-\text{CH}_3)-\text{CH}_2$]. Sie sind in einem breiten Spektrum von Molekulargewichten erhältlich. Sie können als Dispersion, in Lösung oder als Schmelzklebstoff verwendet werden. Obwohl sie in den beiden letzten Fällen bessere Alterungseigenschaften haben, da keine Wechselwirkungen mit Additiven auftreten können, empfiehlt sich aufgrund der Verarbeitungseigenschaften für die Rissverklebung die Verwendung einer Dispersion.

Die Zusammensetzung der Dispersionen ist bei Anwendern bis auf die Hauptkomponente meist nicht bekannt und wird von den Herstellern nicht angegeben. Es ist jedoch bekannt, dass der Zusatz verschiedener Additive üblich ist, wobei konservatorische Ansprüche selten berücksichtigt werden.²⁷¹ Diese Dispersionsbestandteile verbleiben nach der Trocknung im Film und beeinflussen dessen Eigenschaften. Eine Dispersion enthält durchschnittlich: 50-70% Wasser, 30-50% PVAC, 1-3% Netzmittel, 1-3% Katalysator, 0-3% Schutzkolloid, 0-5% Weichmacher, 0-1% Puffer und 0-1% Verdicker.²⁷²

Es gibt zwei Hauptgruppen von Polyvinylacetaten, die sich in ihren physikalischen Eigenschaften grundlegend unterscheiden: Homopolymere Dispersionen besitzen eine hohe Zugfestigkeit, Härte und geringe Flexibilität. Die meisten copolymeren PVAC haben dagegen aufgrund ihrer inneren Weichmachung eine geringere Zugfestigkeit und Härte, dafür aber eine deutlich höhere Flexibilität.²⁷³

Auswahl für die Rissverklebung

Durch einen niedrigen Glasübergangspunkt neigen die meisten Polyvinylacetate zu Schmutzeinbindung und kaltem Fluss (Formveränderung in erhärtetem Zustand unter Belastung).²⁷⁴ Für die Rissverklebung kommen daher nur PVAC-Dispersionen mit möglichst geringem kaltem Fluss und einem Tg in der Nähe von 40 °C in Frage. Allgemein übliche PVAC-Dispersionen in der Gemälderestaurierung sind Mowilith DM5 und DMC2. Diese haben einen Tg unterhalb der Raumtemperatur (2 bzw. 13 °C) und erscheinen daher für die Rissverklebung ungeeignet. Mowilith DM1 mit einem höheren Tg wurde deshalb häufiger verwendet.²⁷⁵ Bedauerlicherweise wurde die Produktion aller drei Dispersionen eingestellt. Für die Versuche wurden daher die weichmacherfreien, homopolymeren PVAC-Dispersionen Mowilith DHS S1, LD167 und D50 aus dem breiten Sortiment ausgewählt. Sie wurden vor allem im Hinblick auf die Zugbeständigkeit als wichtigstem Kriterium für die Rissverklebung ausgesucht. Alle haben einen Tg um 38 °C. Mowilith D50 wird laut Herstellerangaben hauptsächlich zum Kleben von Pappe und Papier verwendet. Es eignet sich auch für Textilbeschichtungen. Mowilith DHS S1 wird als schnellbindender Holzleim mit hoher Temperaturstabilität angewandt. Die Klebkraft ist teilweise höher als die Kohäsion des Holzes. Mowilith LD167 eignet sich zum Kleben von Papier und Holz.²⁷⁶ Die Dispersionen sind noch nicht ausreichend erforscht, um sie für die Anwendung in der Restaurierung zu empfehlen. Dennoch werden sie in dieser Arbeit aus Mangel an Alternativen angewendet. Aus Vergleichsgründen soll auch das bekannte Produkt Mowilith DMC2 in die Untersuchungen einbezogen werden.

²⁷¹ EIPPER 1993, S. 64.

²⁷² WITTE et al. 1984, S. 29.

²⁷³ EIPPER 1993, S. 58.

²⁷⁴ HORIE 1994, S. 92.

²⁷⁵ HEIBER 1996, S. 134.

²⁷⁶ Die Angaben zur Verwendung der Mowilith-Typen stammen aus den technischen Datenblättern der Celanese Emulsions GmbH (CELANESE <www.celanese.com> (07.03.2008) s. Mowilith).

	Tg °C	pH	MFT °C	Viskosität mPa*s	Mittlere Teilchengröße	Feststoffgehalt %
Mowilith DMC2	13	4.0-5.0	5	5.000-11.000	0.3-2.0 µm	55
MowilithDHS S1	38	3.5-5.5	15	30.000-60.000	0.4-2.5 µm	50
Mowilith LD 167	38	5.0-6.0	14	20.000-40.000	0.2-2.0 µm	60
Mowilith D50	38	3.0-4.0	13	20.000-40.000	0.4-0.2 µm	50

Tab. 3: Angaben des Herstellers Celanese Emulsions GmbH zu den Mowilithprodukten

Für die Versuche wurden sowohl die reinen Dispersionen als auch mit Wasser verdünnte Dispersionen verwendet. Heiber empfiehlt eine Verdünnung im Verhältnis 4:1 bzw. 5:1 in Wasser.²⁷⁷ Eipper empfiehlt die Verdünnung der Dispersionen 1: 1 in Wasser, da sie seiner Meinung nach zu hochviskos für die Rissverklebung seien.²⁷⁸ Er „puffert“ zusätzlich einige Dispersionen mit Ammoniak.²⁷⁹ Dies ist jedoch nicht empfehlenswert, da die Alterungsbeständigkeit des Films sinkt, und Ammoniak flüchtig ist und somit nach kurzer Zeit die Neutralisationswirkung nachlässt. Die Veränderung von Dispersionen sollte insgesamt möglichst vermieden werden, da die Komponenten ab Werk ideal aufeinander abgestimmt sind. Bei Veränderungen kann es z.B. zu Entmischungen und damit veränderten Eigenschaften kommen.

Adhäsion

PVAC wird vor allem wegen seiner hohen Klebkraft angewendet. Aufgrund der mittelpolaren Dipol-Dipol-Wechselwirkungen der Acetatgruppen besitzen PVAC sehr gute Adhäsionseigenschaften auf cellulosehaltigen Materialien.²⁸⁰

Kohäsion

Die Zugfestigkeit und Elastizität ist von Molekülaufbau, Molekülgröße und Tg des jeweiligen PVAC abhängig. Dadurch, dass der Tg der meisten Polyvinylacetate in der Nähe der Raumtemperatur liegt, ergibt sich eine hohe Zähigkeit und hohe Klebkraft, aber auch kalter Fluss (vor allem bei niedermolekularen Typen).²⁸¹ Diese Klebstoffe halten deswegen keiner starken oder andauernden Belastung stand. Dies lässt sie für die Rissverklebung, die unter ständiger Spannung steht, als ungeeignet erscheinen. Die für die Versuche in dieser Arbeit ausgewählten PVAC haben jedoch einen sehr hohen Tg von um 38 °C und sind laut Herstellerangaben gegen kalten Fluss beständig.²⁸²

Beim Dehnen der getrockneten Dispersionen kommt es zu einer Streckung in Richtung teilkristalliner Anordnung, was sich mit einem Weißanlaufen des Films bemerkbar macht (dies muss keine Schwächung des Filmverhaltens bedeuten).²⁸³ Nach der Meinung von Eipper sind die homopolymeren Dispersionen für den Einsatz in der

²⁷⁷ Freundliche mündliche Mitteilung von Prof. Winfried Heiber, Dresden.

²⁷⁸ EIPPER 1993, S. 66.

²⁷⁹ EIPPER 1993, S. 67.

²⁸⁰ Freundliche schriftliche Mitteilung von Anja Lethgau, FH Köln 1994, S. 16; HABENICHT 1997, S. 187f.

²⁸¹ HORIE 1994, S. 92.

²⁸² CELANESE <www.celanese.com> (07.03.2008) s. Mowilith.

²⁸³ EIPPER 1993, S. 66.

Rissverklebung zu hart und spröde, die copolymeren Dispersionen dagegen aber zu weich. Deshalb müsse die Herstellung von Mischungen für die Rissverklebung erwogen werden.²⁸⁴

Reaktion auf Klimaschwankungen

PVAC-Dispersionen sind wasserunlöslich, aber quellbar.²⁸⁵ Wasserlösliche Schutzkolloide wie Polyvinylalkohole oder Methylcellulose erhöhen die Quellbarkeit aufgetrockneter Filme.

Durch die Quellreaktionen könnte in feuchter Umgebung die Belastbarkeit herabgesetzt werden. Ein Erweichen bei hoher relativer Feuchtigkeit kann jedoch auch von Vorteil sein, da vorgeleimte und bemalte Leinengewebe sich bei Feuchtigkeitswerten bis etwa 80% zunächst ausdehnen und schlaffer werden. Dabei werden die Leinenfasern durch die quellende Vorleimung deformiert.²⁸⁶ Erst ab etwa 80% relativer Feuchte dominiert die Quellreaktion der Leinenfasern, was eine Straffung des Gewebes und damit eine erhöhte Zugspannung zur Folge hat.²⁸⁷ Unter dem Einfluss von Luftfeuchtigkeit kann zudem Säureabspaltung stattfinden.²⁸⁸

Löslichkeit / Reversibilität

Die Löslichkeit von getrocknetem PVAC ist von der Molekülgröße abhängig. Sie nimmt durch künstliche Alterung nur leicht ab.²⁸⁹ PVAC ist in mittelpolaren Lösungsmitteln wie Aceton, Estern und Ethylacetat löslich, und in aromatischen Kohlenwasserstoffen teilweise löslich. In Wasser und Alkoholen ist es unlöslich, aber quellbar, in aliphatischen Kohlenwasserstoffen ist es unlöslich.²⁹⁰ Bei der Abnahme mit Lösungsmitteln sollte das Eindringen des gelösten PVACs in die Fasern verhindert werden.²⁹¹

Da PVAC thermoplastisch ist, ist eine Abnahme durch Wärme theoretisch möglich, in der Praxis jedoch problematisch.²⁹²

Alterung

Generell weisen Polyvinylacetate eine hohe Lichtstabilität auf. Es kann zu geringen Oxidationsreaktionen, Gelbung und minimaler Quervernetzung kommen.²⁹³ Die mechanischen Eigenschaften wie z.B. die Flexibilität werden teilweise als unverändert beschrieben.²⁹⁴ Eine Studie des Canadian Conservation Institute beschreibt jedoch unterschiedliche Änderungen bei verschiedenen PVAC-Dispersionen.²⁹⁵

Unter Einwirkung von Feuchtigkeit ist eine hydrolytische Spaltung der Esterbindung unter Freisetzung von Essigsäuren möglich.²⁹⁶ In mehreren Studien wurde festgestellt, dass sich der pH-Wert der meisten Dispersionen bei der Alterung in den sauren Bereich verschiebt.²⁹⁷ Die Ausdünstung von Essigsäuren ist am Anfang sehr hoch, nimmt nach einem Monat aber rapide ab.²⁹⁸ Es muss daher einige Monate nach der Verklebung auf einen regelmäßigen Luftaustausch an der

²⁸⁴ EIPPER 1993, S. 66.

²⁸⁵ HORIE 1994, S. 92.

²⁸⁶ SCHAIBLE 1987, S. 87.

²⁸⁷ HEDLEY 1993, S. 114.

²⁸⁸ EIPPER 1993, S. 70.

²⁸⁹ EIPPER 1993, S. 55; HOWELLS et al. 1984, S. 39.

²⁹⁰ HORIE 1994, S. 94; EIPPER 1993, S. 56.

²⁹¹ HAUSMANN 2005, S. 79-114.

²⁹² HAUSMANN 2005, S. 94.

²⁹³ HORIE 1994, S. 92.

²⁹⁴ KEYSERLINGK 1990, S. 310.

²⁹⁵ DOWN et al. 1996.

²⁹⁶ EIPPER 1993, S. 56.

²⁹⁷ KEYSERLINGK 1990, S. 310; HOWELLS et al. 1984, S. 42; WORCH 2006, S. 29; DOWN et al. 1996, S. 29.

²⁹⁸ DOWN et al. 1996, S. 27 und S. 39.

Nach Versuchen der Autorin der vorliegenden Arbeit beträgt der pH-Wert von Mowlith LD167 das direkt aus der Dose kommt 5, der Wert fällt in

Verklebungsstelle geachtet werden.

Durch Alterung vergilben PVAC-Dispersionen. Es konnte jedoch beobachtet werden, dass die Vergilbung keine signifikante Änderung in der Löslichkeit zur Folge hatte. Daher sind vermutlich die relativ instabilen Dispersionszusätze Ursache der Vergilbung.²⁹⁹

PVAC mit extern zugesetzten Weichmachern sollte nicht verwendet werden, da diese schlechte Alterungseigenschaften haben und in das verklebte Material auswandern können.³⁰⁰

4.3.7 Acryldispersionen

Acrylharze werden aus Acryl- und Methacrylester-Monomeren polymerisiert.³⁰¹ Sie können in Lösungsmitteln gelöst, als Dispersionen oder als Schmelzklebstoff verwendet werden. Zur Herstellung einer Dispersion werden eine Anzahl an Additiven benötigt. So setzt sich eine Dispersion durchschnittlich zusammen aus: Wasser (50-70%), Polymer (30-50%), Tensid (1-3%), Initiator (1-3%), Schutzkolloid (0-3%), Puffer (0-1%) und Wasser.³⁰²

Auswahl für die Rissverklebung

Die in der Gemälderestaurierung üblichen Acryldispersionen sind Plextol B500, D498, D360³⁰³, Lascaux 498HV und 360HV, Primal AC33 und das

Acrylstyrolcopolymer MfK³⁰⁴. In der Textilrestaurierung werden aufgrund der höheren Viskosität die mit Acrylsäureester angedickten Dispersionen Lascaux 360HV und 498HV bevorzugt.³⁰⁵ MfK ist mit einem besonders guten Penetrationsvermögen für die Festigung gefasster Oberflächen entwickelt worden und daher für die Rissverklebung ungeeignet. Primal AC33 wird nicht mehr hergestellt. Plextol D360 und Lascaux 360HV sind nach dem Trocknen zu weich und klebrig für eine Rissverklebung. Deshalb wurden Plextol B500, D498 sowie Lascaux 498HV ausgewählt. Da diese immer noch sehr niedrige Glasübergangspunkte haben, und daher kalter Fluss bei Dauerbelastung zu erwarten ist, soll zusätzlich die Eignung des bisher in der Gemälderestaurierung wenig verwendeten Plextol D540 geprüft werden. Es handelt sich um ein Methacrylsäureester-Acrylsäureester-Copolymerisat mit anionischem Emulgatorsystem. Plextol D540 ist zudem frei von Filmbildungsmitteln, Weichmachern und Lösungsmitteln.³⁰⁶

trockenem Zustand auf 4-5. Nach 15 Wochen hat der trockene Film wieder einen pH-Wert von 5 erreicht. Der pH-Wert von Mowilith DHS S1 liegt konstant bei 4 (frisch, getrocknet und 15 Wochen alt). Der pH-Wert von Mowilith D50 liegt frisch bei 4, fällt während der Trocknung auf 3-4 und steigt nach 15 Wochen auf 5 an.

²⁹⁹ HOWELLS et al. 1984, S. 42; HORIE 1994, S. 94.

³⁰⁰ EIPPER 1993, S. 63.

³⁰¹ Nach Analysen von DOWN et al. 1996 (S. 21) besteht der Feststoff in Plextol B500 zu 66% aus Ethylacrylat und zu 34% aus Methylmethacrylat; Lascaux 498HV besteht aus 56% Butylacrylat und 44% Methylmethacrylat.

³⁰² DeWITTE et al. 1984, S. 32.

³⁰³ Im Verlauf dieser Diplomarbeit stellte sich heraus, dass Plextol D360 nicht mehr hergestellt wird. Im Handel wird als geeigneter Ersatz die Dispersion K360 angeboten. Forschungen von Jenny Nieberle und Anna Bannach in Zusammenarbeit mit Prof. Dr. Jägers ergaben, dass sich die Zusammensetzung geändert hat. Während D360 aus nBuMA und MA zusammengesetzt ist, besteht K360 dem FTIR-Spektrum zufolge aus PBA, Polyacrylnitril und Phtalat. Es ist also ein Weichmacher enthalten. Der pH-Wert liegt deutlich niedriger bei 2-3 (bei D360 noch 8) und ist damit zu sauer für die Anwendung in der Restaurierung. Durch das Andicken mit Polyacrylsäure und Ammoniak kann der pH-Wert auf 8 eingestellt werden. Die getrocknete Dispersion ist zudem deutlich klebriger als das Vorgängerprodukt und auch aus diesem Grund nicht geeignet für eine Rissverklebung.

³⁰⁴ Medium für Konsolidierung (Lascaux)

³⁰⁵ WORCH 2006, S. 29. Die angedickten Dispersionen werden immer mit Wasser (im Verhältnis 1:4 bis 1:10) verdünnt.

³⁰⁶ POLYMERLATEX <www.polymerlatex.com> (10.03.2008), s. Plextol.

	T _g °C	pH	MFT °C	Viskosität Pa*s	Mittlere Teilchen- größe	Feststoff- gehalt %	Wasserauf- nahme (in 24 h) %	Reißfestigkeit N/mm ²	Reißdehnung %
Plextol B500	9	9,5	7	1-5 Pa*s	0.15 µm	50	15	3	500
Plextol D360	keine Angabe	7,5	0	1-4 Pa*s	0.25µm	60	Keine Angabe	Nicht gerissen bei 1000% Dehnung	1000
Plextol D498	13	9,0	5	3-10 Pa*s	0.15 µm	50	10	4	400
Lascaux 498 HV	6	8,0-9,0	5	6-9 Pa*s	0.15 µm	ca. 40%	12	4	400
Plextol D540	29	9,0	20	3-10 Pa*s	0.15 µm	50	9	12	250

Tab. 4: Angaben der Hersteller PolymerLatex GmbH und Lascaux AG zu Plextolprodukten

Zusätzlich wäre der Einsatz von Plextol XA561 und M615 denkbar, leider konnte jedoch vom Hersteller keine Probe zur Verfügung gestellt werden und kleine Mengen dieser Klebemittel sind im Handel nicht erhältlich.³⁰⁷

Laut Becker eignen sich für die Rissverklebung am besten Dispersionen, die im Verhältnis 5:2 mit Wasser verdünnt wurden.³⁰⁸ Deshalb sollen außer den reinen Dispersionen auch verdünnte getestet werden.

Adhäsion

Laut Gehmann und Duffy zeigen Acrylate eine besonders gute Adhäsion auf vielen Materialien.³⁰⁹ Das Haftvermögen steigt bei Erhöhung der Bindemittelmenge, der Temperatur oder des Drucks bei der Verklebung. Es nimmt dagegen bei Zugabe von Verdickungsmitteln ab. Durch eine Nassklebung wird eine stärkere Bindung erreicht als bei reiner Wärmeversiegelung.³¹⁰ Eine bessere Adhäsion kann auch durch die Anwendung in Lösemitteln erreicht werden.³¹¹ Aufgrund der Lösemittelbelastung beim Verkleben erscheint dies für eine Rissverklebung allerdings nicht geraten.

Kohäsion

Acrylharzfilme sind im Vergleich mit anderen Klebemitteln im Allgemeinen sehr flexibel und dehnbar.³¹² Die Kohäsion ist daher im Vergleich eher schwach. Laut Roux werden Acryldispersionen nur selten für Rissverklebungen verwendet, da sie zu elastisch sind und schnell Deformationen entstehen.³¹³ Auch im Vergleich mit PVAC sind Acrylate flexibler und weniger zugbeständig.³¹⁴ Im Allgemeinen sind Methacrylate härter, haben höhere Zugkräfte und weniger Dehnbarkeit als die übrigen Acrylate.³¹⁵

Laut Duffy sind besonders die Dispersionen Plextol B500 und Lascaux 498HV für Verklebungen mit hoher Belastbarkeit geeignet.³¹⁶ Laut Becker bildet Lascaux 498HV einen zähelastisch harten und extrem zugfesten Film.³¹⁷

³⁰⁷ Sie haben eine mit Plextol D540 vergleichbare Zusammensetzung. Plextol M615 ist zur Reduktion der Mindestfilmbildungstemperatur (MFT) ein Filmbildungshilfsmittel zugesetzt. Die relativ hohen MFT von bis zu 27 °C sind nicht relevant, da die Klebungen mit der Heiznadel getrocknet werden.

³⁰⁸ BECKER 2000, S. 139.

³⁰⁹ GEHMAN 1990, S. 437; DUFFY 1989, S. 67-77.

³¹⁰ ERHARDS 1993, S. 33.

³¹¹ DOWN et al. 1996, S. 32.

³¹² DOWN et al. 1996, S. 41.

³¹³ ROUX 1993, S. 107. Gegenüber Dispersionen haben Acrylharzlösungen generell eine deutlich höhere Festigkeit und geringere Elastizität (siehe DOWN et al. 1996, S. 32).

³¹⁴ DOWN et al. 1996, S. 34.

³¹⁵ GEHMAN 1990, S. 138.

³¹⁶ DUFFY 1989, S. 67-77.

³¹⁷ BECKER 2000, S. 70.

Bedenklich erscheint jedoch der niedrige Tg von 13 °C, der kalten Fluss bei stetiger Belastung bei Raumtemperatur vermuten lässt. Die Dispersionen Plextol D540 mit höherem Tg ist 3mal zugfester, aber auch nur halb so elastisch wie Plextol B500 (siehe Tab. 4).

Reaktion auf Klimaschwankungen

Acryldispersionen sind nach der Trocknung wasserunlöslich, bleiben aber wasserempfindlich.³¹⁸ Laut Duffy besteht eine Gefahr der Reaktivierung durch Wasser.³¹⁹ Die Wasserquellbarkeit verringert sich allerdings durch Alterung. Das bedeutet auch, dass die Filme weniger wasserdurchlässig werden.³²⁰

Einige nichtflüchtige Puffer, die in den Dispersionen enthalten sein können, haben unter feuchten Bedingungen die Tendenz zur Migration.³²¹ Möglicherweise werden dabei Stoffe freigesetzt, die eine Abbaureaktion der Naturfasern beschleunigen können.

Löslichkeit / Reversibilität

Die getrockneten Dispersionen sind nur schlecht mechanisch oder durch Wärme entfernbare. Sie können in Aromaten, Ketonen und Estern wie Xylol, Toluol, Butylacetat, Ethylacetat, Methylethylketon und Aceton gelöst werden. Unlöslich sind sie in Alkoholen und aliphatischen Kohlenwasserstoffen.³²²

Die Löslichkeit der in dieser Arbeit angewendeten Dispersionen ändert sich weder bei natürlicher noch bei künstlicher Alterung.³²³

Alterung

Im Allgemeinen haben Acrylate sehr gute Alterungseigenschaften, besser beispielsweise als Polyvinylacetate.³²⁴ Die Alterungsbeständigkeit ist aber vom Typ abhängig. So verhält sich PMMA besonders stabil, während z.B. PBMA zu Quervernetzungen neigt.³²⁵

Die zur Stabilisation der Dispersionen zugesetzten Substanzen verbleiben im Bindemittelfilm und können zu möglichen Störfaktoren bei der Alterung werden.³²⁶ Bei Plextol B500 beispielsweise wirken sich die Zusätze negativ auf die Lichtalterung aus.³²⁷ Das Andicken mit Polymethacrylsäure hat nach bisherigen Untersuchungen keinen Einfluss auf das Alterungsverhalten eines Bindemittelfilms.³²⁸ Nach Duffy konnten keine Unterschiede in der Flexibilität zwischen gealterten und ungealterten Proben gemessen werden.³²⁹ Laut seinen Angaben verhalten sich die Zugeigenschaften von Plextol B500 während der Alterung am stabilsten.³³⁰ Erhards berichtet dagegen, dass bei ihren Versuchen vor allem Plextol B500 sehr stark auf künstliche Klima- und Lichtalterung reagiert, woraus vor allem eine tendenzielle Zunahme der Zugfestigkeit resultiere.³³¹

³¹⁸ ROUX 1993, S. 107.

³¹⁹ DUFFY 1989, S. 67-77.

³²⁰ DUFFY 1989, S. 67-77.

³²¹ ERHARDS 1993, S. 20.

³²² ERHARDS 1993, S. 58f.

³²³ ERHARDS 1993, S. 59; PARKER 2005, S. 27.

³²⁴ DOWN et al. 1996, Studie des Canadian Institute for Conservation, in der das Alterungsverhalten von 27 PVAC- und 25 Acrylharzbindemitteln über 5 Jahre geprüft wurde.

³²⁵ HORIE 1994, S. 103.

³²⁶ WORCH 2006, S.29.

³²⁷ VON HOFF 2005, S. 59.

³²⁸ ERHARDS 1993, S. 35.

³²⁹ DUFFY 1989, S. 67-77.

³³⁰ DUFFY 1989, S. 67-77. Es ist stabiler als Lascaux 498 HV und 360 HV sowie Plextol D498 und D360.

³³¹ ERHARDS 1993, S. 81.

Bei der Alterung kommt es zur Abspaltung geringer Mengen von Essigsäure bei Lascaux 360HV,³³² daher vermutlich auch bei 498HV.

Howells et al. beobachteten eine Gilyungstendenz, die auch im Dunkeln auftritt, aber keine Veränderungen in der Löslichkeit mit sich bringt.³³³ Änderungen der mechanischen Belastbarkeit wurden nicht überprüft.

Zu Veränderungen im pH-Wert wurden gegensätzliche Beobachtungen gemacht: nach Erhards gibt es keine Veränderungen, dagegen berichtet Parker dass der pH-Wert sinkt.³³⁴

Die unterschiedlichen Beobachtungen zum Alterungsverhalten der Acryldispersionen können sowohl auf unterschiedliche Versuchsaufbauten als auch auf die möglicherweise durch den Hersteller geänderten Zusammensetzungen sowie die Vielfalt der getesteten Dispersionen zurückgeführt werden.

Über die Alterungseigenschaften der Dispersionen Plextol XA561, M615 und D540 ist noch nichts bekannt.

Weitere Eigenschaften

Der pH-Wert der Dispersionen liegt relativ hoch, sinkt jedoch schon mit dem Trocknen, durch Alterung kann der pH-Wert weiter sinken. Zum Beispiel hat Plextol B500 als Dispersion einen pH-Wert von 7,7, als frischer Film von 5,8 und als gealterter Film von 5,2. Plextol D498 weist als Dispersion einen pH-Wert von 8,9 auf, als frischer Film pH 5,9 und als gealterter Film pH 5,8.³³⁵

Der Glasübergangspunkt ist bedingt durch verschiedenen Aufbau unterschiedlich: Plextol B500 hat einen Tg von 9 °C, Plextol D498 von 13 °C, Lascaux 498HV von 6 °C und Plextol D540 29 °C.³³⁶

Eine volle Belastbarkeit der Verklebung ist erst gegeben, nachdem die Verklebung mindestens 24 Stunden geruht hat.³³⁷

Mit längeren Wartezeiten steigt laut Becker die Festigkeit des Klebemittels Lascaux 498HV.³³⁸ Ein Zeitpunkt, ab dem die Festigkeit nicht weiter ansteigt, wurde bisher nicht ermittelt.

4.3.8 Polyamide (PA)

Polyamide sind Kohlenwasserstoffketten mit eingebauten Carbonamidgruppe (-CO-NH). Die allgemeine Strukturformel lautet $-\text{[NH}-(\text{CH}_2)_x\text{-CO]}_n-$. Die linearen Moleküle sind durch Verklammerungen, Schlaufenbildungen und Verhakung der Molekülketten sowie über Wasserstoffbrückenbindungen verbunden. Die Ketten können sich auch parallel anordnen und teilkristalline Bereiche bilden. Das durchschnittliche Molekulargewicht liegt zwischen 5000 und 8000 g/mol.³³⁹

Polyamide sind thermoplastisch. Sie haben einen schmalen Erweichungsbereich mit definiertem Schmelzpunkt und eine niedrige Schmelzviskosität.³⁴⁰ Bei allen Polyamiden ist der Kontakt der Schmelzen mit Luftsauerstoff kritisch, da sie hier oxidativem Abbau ausgesetzt werden.³⁴¹ Nach der Erstarrung der Schmelze bleiben die Folien und die Verklebungen lange elastisch und plastisch dehnbar.³⁴² Erst nach einigen Stunden bekommt das Material seine entsprechende Festigkeit. Nach der Verklebung sollte eine Klebestelle deshalb nicht sofort belastet werden.

³³² DOWN et al. 1996, S. 29.

³³³ HOWELLS et al. 1984, S. 42.

³³⁴ ERHARDS 1993, S. 56; PARKER 2005, S. 26.

³³⁵ PARKER 2005, S. 26.

³³⁶ POLYMERLATEX <www.polymerlatex.com> (10.03.2008), s. Plextol; LASCAUX <www.lascaux.ch> (09.04.2008) s. Lascaux 498HV; KREMER <www.kremer-pigmente.de> (29.04.2008), s. Paraloid B72; DEGUSSA <www.degussa.de> (23.04.2008), s. PQ611.

³³⁷ GEHMAN 1990, S. 444.

³³⁸ BECKER 2000, S. 141 und S. 116. Die Festigkeit der Verklebung nach einem Tag und nach 3 Wochen unterscheidet sich signifikant.

³³⁹ BODECHTEL 2000, S. 26.

³⁴⁰ BODECHTEL 2000, S. 9.

³⁴¹ DOMININGHAUS et al. 1972, S. 80.

³⁴² BODECHTEL 2000, S. 48.

Für die Rissverklebung ausgewählt

Im Restaurierungsbedarf sind zum Verkleben drei „Polyamidpulver“ erhältlich: Die Polyamid-Textil-Schweisspulver Nr. 5065 (mit einem Schmelzpunkt von 80 °C) und Nr. 256 (mit einem Schmelzpunkt von 110-120 °C) der Firma Lascaux,³⁴³ sowie das Textilschweißpulver 130-133 °C der Firma Kremer Pigmente.³⁴⁴ Die genaue Zusammensetzung der Inhaltstoffe ist nicht bekannt. Prof. Dr. Jägers analysierte durch FTIR-Spektroskopie bei allen Polyamid-Pulvern PA11 (Nylon 11) mit identischem Kurvenverlauf.³⁴⁵ Es handelt sich somit um aliphatische Polyamide aus Aminoundecansäure-Monomeren.³⁴⁶ Die unterschiedlichen Schmelzpunkte sind auf verschiedene Kettenlängen und möglicherweise auch auf unterschiedliche Zusätze zurückzuführen. Der Schmelzpunkt von reinem PA 11 wird in der Literatur mit 185 °C, also deutlich höher als bei den hier genannten Textilschweißpulvern, angegeben.³⁴⁷ Es ist daher sehr wahrscheinlich, dass Zusätze enthalten sind, die nicht analysiert werden konnten. Mögliche Zusätze sind klebrigmachende Harze wie z.B. Kumaron-Inden-Harze, Polyterpenharze, Petroleumharze oder Kolophonium; Weichmacher wie Phthalsäureester; Stabilisatoren und Antioxidantien wie Phenole, Phosphite oder organische Sulfite sowie Füllstoffe und Streckmittel wie Kieselsäure, Quarzmehl oder Kreide.³⁴⁸

Die Polyamidpulver wurden für die Testreihe ausgewählt, da sie in der Restaurierung häufig zum Einsatz kommen, wenn Risse in wachs- oder wachsharzgetränkten Geweben auftreten.³⁴⁹ Auch bei sehr wasser-empfindlichen Objekten kann der Einsatz von Schmelzklebstoffen sinnvoll sein. Das Pulver 256 ist nicht mehr im Handel erhältlich und wird daher für die Versuche nicht verwendet.

Name	Hersteller/ Vertrieb	Zusammensetzung	Schmelzpunkt °C
Polyamid-Textil-Schweisspulver Nr. 5065	Lascaux	PA 11	80
Polyamid-Textil-Schweisspulver Nr. 256	Lascaux (nicht mehr im Angebot)	nicht analysiert	110-120
Textilschweißpulver	Texolit (Vertrieb über Kremer Pigmente)	PA 11	130-133

Tab. 5: Eigenschaften der Polyamidpulver

Adhäsion

Polyamidschmelzen werden vor allem wegen ihrer hohen Klebkraft, besonders auf wachsharz-getränkten Geweben, geschätzt.³⁵⁰ Bodechtel testete das Pulver Nr. 5065 im Vergleich mit anderen Klebstoffen. Es wurden Leinenfäden mit einem Durchmesser von 0,3 mm verwendet und die Belastbarkeit durch Zug an einer Briefwaage ermittelt. Die Zugbeständigkeit lag zwischen der von Ponal und dem Störleim-Weizenstärkekleister-Gemisch.³⁵¹ In Tests von Bischoff wurden Leinengewebe verklebt und mit der Hand auseinandergezogen. Die Zugbeständigkeit der Polyamidklebung lag dabei zwischen Beva und Störleim und somit deutlich niedriger als bei Bodechtel.³⁵²

³⁴³ LASCAUX <www.lascaux.ch> (09.04.2008), s. Polyamidschweißpulver. Sie werden im Sicherheitsdatenblatt als Copolyamide bezeichnet, im Produktdatenblatt dagegen als Nylon 12 (PA 12). Sie wären demnach aus 12-C-atomigen Monomeren (Lactamen von Aminocarbonsäuren) aufgebaut und kein Copolyamid (Polykondensation aus verschiedenen Bausteinen).

³⁴⁴ Dabei handelt es sich nach Analysen von Bodechtel nicht um ein Polyamid (BODECHTEL 2000, S. 33). In dieser Arbeit soll den Analysen von Frau Prof. Dr. Jägers vertraut werden.

³⁴⁵ Freundliche mündliche Mitteilung von Prof. Dr. Jägers, FH Köln.

³⁴⁶ DOMININGHAUS et al. 2005, S. 910.

³⁴⁷ DOMININGHAUS et al. 2005, S. 943; BRYDSON 1999, S. 493.

³⁴⁸ BODECHTEL 2000, S. 22.

³⁴⁹ PLÖTZ 2003; BODECHTEL 2000, S. 37; ROUX 1993, S. 110.

³⁵⁰ BODECHTEL 2000, S. 37; ROUX 1993, S. 110.

³⁵¹ BODECHTEL 2000, S. 46f.

³⁵² BODECHTEL 2000, S. 48 (Gudrun Bischoff: Untersuchungs- und Restaurierungsbericht des Leinwandgemäldes von Christian Wilhelm Karl Kehrer „Das asiatische Nashorn“ um 1816/18, Hessisches Landesmuseum Darmstadt, 1997, unveröffentlicht).

Kohäsion

Polyamide im Allgemeinen zeigen eine hohe Festigkeit, Steifheit und Härte, besonders im hochkristallinen Zustand. Sie werden vor allem dort eingesetzt, wo von einem thermoplastischen Material hohe Festigkeit verlangt wird.³⁵³ Der Anteil an kristallinen Bereichen ist mitbestimmend für die Kohäsionsfestigkeit der Klebeschicht. Er ist bei langsamem Abkühlen besonders hoch. Auch beim Strecken der Klebestelle entstehen hochkristalline parallel gelagerte Kristallite.³⁵⁴ Als Nachteil wird in einigen Fällen die stärker ausgeprägte Biegsamkeit angesehen.³⁵⁵ Die Reißfestigkeit von PA 11 wird mit 50 N/mm² angegeben, die Reißdehnung beträgt 500%.³⁵⁶

Aufgrund des viskoelastischen Charakters haben Polyamide eine Neigung zum Kriechen bei erhöhter Temperatur und/oder statischer Dauerbelastung.³⁵⁷ Dabei kann es zu einem zeitabhängigen Spannungsabbau durch Verformung (Relaxation) kommen.³⁵⁸

In den meisten Fällen wird die Anwendung des Pulvers Nr. 5065 als ausreichend für die Zugbelastung bei Einzelfadenverklebungen erachtet.³⁵⁹ Für höhere Zugbelastungen wurde von Lascaux das Pulver Nr. 256 empfohlen.³⁶⁰ Dieses wird jedoch aufgrund der geringen Anfrage nicht mehr vertrieben. Das Textilschweißpulver der Firma Kremer Pigmente hat mit 130-133 °C den höchsten Schmelzbereich der drei Produkte. Es ist daher eine noch höhere Zugfestigkeit zu erwarten. Bodechtel vermutet, dass die Verklebungen unelastischer und eventuell auch höher belastbar sind, da sich bei ihren Versuchen die geschmolzene Folie als vergleichsweise sehr steif und fest erwies.³⁶¹

Reaktion auf Klimaschwankungen

Polyamide haben im Vergleich mit anderen Polymeren eine hohe Feuchtigkeitsaufnahme und Wasserdampfdurchlässigkeit. Sie steigt abhängig vom Molekulaufbau mit der Anzahl der -CO-NH-Gruppen (Säureamidgruppen, Carbonamidgruppen) und fällt mit wachsender Kristallinität.³⁶² PA 11 hat jedoch im Vergleich zu den anderen Polyamiden eine geringere Wasseraufnahme von maximal 2,5%.³⁶³ Mit steigendem Feuchtigkeitsgehalt verschlechtern sich mechanische Eigenschaften und Abriebfestigkeit. Je höher der Feuchtigkeitsgehalt, desto mehr verschiebt sich auch der Tg nach unten.³⁶⁴ Bei gleicher Temperatur führt daher ein höherer Feuchtigkeitsgehalt zu einer höheren Dehnung und geringerer Belastbarkeit. Gleichzeitig kommt es durch die Wasseraufnahme zu einer Volumenzunahme, einer Verringerung zwischenmolekularer Bindungskräfte, erhöhter Kettenbeweglichkeit, verringerter Steifheit, Festigkeit und Härte sowie verringerten Gleitlaufeigenschaften und Verschleißwiderstand.³⁶⁵

Löslichkeit / Reversibilität

Es gibt keine Möglichkeit, Polyamide aus organischen oder brüchigen Materialien wieder herauszulösen ohne diese zu beschädigen.³⁶⁶ Polyamide zeigen eine hohe Beständigkeit gegen Lösungsmittel (Benzine, Ester, Alkohole, Ketone,

³⁵³ BODECHTEL 2000, S. 9 und S. 12.

³⁵⁴ BODECHTEL 2000, S. 6 und S. 25; McGLINCHEY 1993, S. 116.

³⁵⁵ ROUX 1993, S. 110.

³⁵⁶ DOMININGHAUS et al. 2005, S. 943.

³⁵⁷ BODECHTEL 2000, S. 26.

³⁵⁸ NÄGLER 2005, S. 36.

³⁵⁹ BODECHTEL 2000, S. 37.

³⁶⁰ BODECHTEL 2000, S. 37.

³⁶¹ BODECHTEL 2000, S. 44.

³⁶² BODECHTEL 2000, S. 10. Wasser wird nur in den amorphen Bereichen aufgenommen.

³⁶³ DOMININGHAUS et al. 1972, S. 77.

³⁶⁴ GRELLMANN, SEIDLER 1998, S. 201. Zum Beispiel hat PA6 bei 3,5% Feuchtegehalt einen Tg von 5 °C, bei 10% Feuchtegehalt liegt der Tg schon bei -15 °C.

³⁶⁵ GRELLMANN, SEIDLER 1998, S. 202.

³⁶⁶ BODECHTEL 2000, S. 21.

Ether), Laugen und verdünnte Säuren, sind jedoch löslich in konzentrierten Säuren.³⁶⁷ Eine Löslichkeit oder auch nur eine Quellung durch Ethanol, Aceton, Toluol, Dimethylformamid und Shellsol T auch nach dreitägigem Bad konnten nicht festgestellt werden.³⁶⁸

Die thermoplastische Verklebung kann jedoch mit Wärme wieder geöffnet und bearbeitet werden.

Alterung

Die allgemeine Annahme, dass Polyamide eine schlechte Alterungsbeständigkeit haben, ist nur teilweise richtig. UV-Strahlung und Luftsauerstoff bewirken eine Verminderung der mechanischen Beständigkeit innerhalb weniger Monate.³⁶⁹ Während der Alterung, die hauptsächlich durch UV-Strahlung ausgelöst wird, kommt es zu Vergilbung bis Verbräunung und das Molekulargewicht nimmt ab.³⁷⁰ Die Verklebung wird dadurch mechanisch weniger belastbar, Dehnbarkeit und Zugfestigkeit werden geringer. Im Verlauf der weiteren Alterung können auch Vernetzungsreaktionen auftreten.³⁷¹ Es kann zu Volumenschrumpfung von bis zu 6% und damit verbundenen Spannungen kommen.³⁷²

Wenn Polyamide jedoch unter Lichtausschluss bei Raumtemperatur verwendet und gelagert werden, ändern sich die mechanischen Eigenschaften über lange Zeiträume nicht.³⁷³ Diese Bedingungen sind bei einer Rissverklebung in den allermeisten Fällen gegeben.

Die Alterung der in der Restaurierung zum Verkleben verwendeten Polyamidpulver ist noch nicht ausreichend erforscht. Die Alterung von Polyamid 11 wird in der Literatur nicht gesondert thematisiert. Langzeiterfahrungen von Restauratoren liegen nicht vor, da es erst seit ca. 25 Jahren verwendet wird.³⁷⁴ Laut Bodechtel war bisher die Wiederöffnung eines Risses noch nie nötig.³⁷⁵ In der Textilrestaurierung werden Polyamidschweißpulver jedoch aufgrund der schlechten Alterungseigenschaften nicht mehr verwendet.³⁷⁶

4.3.9 BEVA 371

BEVA 371 (Berger's Ethylen-Vinyl-Acetat) wurde von Gustav Berger in den 70er Jahren als Alternative zu den Doublierklebstoffen entwickelt. Es ist wie folgt zusammengesetzt:³⁷⁷

- 45% Ethylen-Vinylacetat Copolymer mit 32% Vinylacetat (Elvax Harz 150)
- 27% Cyclohexanonharz (ehemals Keton N, vermutlich ersetzt durch Laropal K80)
- 15% Ethylen-Vinylacetat-Copolymer mit 15% Vinylacetat (AC-Copolymer 400)
- 9% ölfreies Paraffin mit einem Schmelzpunkt von 65 °C
- 4% Cellolyn 21 (Ester der Phtalsäure mit Hydroabietinalkohol)

BEVA 371 kann in Lösungsmitteln gelöst oder als Heißsiegelklebstoff bei ca. 65 °C (Erweichungsbereich 40-70 °C)³⁷⁸ verwendet werden. Die Verklebung ergibt sich durch das Verflüssigen des Paraffins, das einen engen Kontakt zu den Fasern herstellt. Die höhermolekularen Verbindungen fungieren dagegen als Stützgerüst, das die Steifheit und Kohäsion

³⁶⁷ SCHWARZ 2000, S. 121.

³⁶⁸ BODECHTEL 2000, S. 50. Lediglich eine leichte Versprödung durch das Toluolbad trat ein.

³⁶⁹ DOLEZEL 1978, S. 218.

³⁷⁰ BODECHTEL 2000, S. 9; NÄGLER 2005, S. 37; WAENTIG 2004, S. 283.

³⁷¹ NÄGLER 2005, S. 37.

³⁷² NÄGLER 2005, S. 38; WAENTIG 2004, S. 284.

³⁷³ DOLEZEL 1978, S. 221. Der „lange Zeitraum“ ist nicht definiert, aber es wird ein Beispiel genannt, bei dem nach sechs Jahren keinerlei Veränderung zu bemerken war.

³⁷⁴ BODECHTEL 2000, S. 50.

³⁷⁵ BODECHTEL 2000, S. 62.

³⁷⁶ WORCH 2006, S. 31.

³⁷⁷ BERGER 1976, S. 179. Die Zusammensetzung der BEVA-Folie hat sich seit 1993 nicht geändert (Freundliche mündliche Mitteilung von Prof. Dr. Jägers, FH Köln, aufgrund eines Vergleichs von FTIR-Spektren).

³⁷⁸ LANZ 1996, S. 43.

der Mischung erhöht. Eine Verklebung kann in warmen Zustand mit minimalem Druck erreicht werden. Die Klebung sollte möglichst unter Druck, z.B. durch eine Pinzette, erkalten.

Adhäsion

BEVA 371 klebt auf den meisten Materialien, u.a. auch auf Hostaphan.³⁷⁹ Laut Berger ist die Adhäsionskraft zehnmal höher als die von konventionellen Wachs-Harz-Mischungen.³⁸⁰ Es könnte daher auch für die Verklebung wachsbeschichteter, harzgetränkter oder ölgeläuterter Fäden geeignet sein.

Kohäsion

BEVA 371 ist ein flexibler und dehnbarer Klebstoff mit einer Zugbeständigkeit im Mittelfeld der Acrylklebstoffe.³⁸¹ Berger beschreibt die Mischung als „einigermaßen steif und bei Raumtemperatur ohne kalten Fluss“.³⁸² Aufgrund dieser Aussagen erscheint BEVA 371 als geeigneter Klebstoff für die Rissverklebung.

Anhand praktischer Erfahrungen verfügt BEVA 371 jedoch über eine eher geringe Klebkraft, die zwar für eine Doublierung angemessen ist, für eine punktartige Fadenverklebung aber eventuell nicht ausreicht. Auch Berger selbst hält BEVA 371 für ungeeignet zum Verkleben von Rissen, da es nicht steif genug sei.³⁸³

Reaktion auf Klimaschwankungen

Beva-Filme sind wasserdampfdurchlässig.³⁸⁴

Löslichkeit / Reversibilität

Klebung mit BEVA 371 können durch Wärme wieder gelöst und neu verklebt werden. Der Klebstoff ist außerdem reversibel durch Gelbildung in aliphatischen Kohlenwasserstoffen und Aromaten.³⁸⁵ Laut Berger ist so eine vollständige Abnahme ohne Flecken möglich.³⁸⁶ Es besteht jedoch bei allen Methoden die Gefahr einer tieferen Penetration des Klebstoff in die Fasern beim Wiederanlösen. Nach Angaben von Berger ist BEVA 371 auch nach Alterung sehr gut reversibel.³⁸⁷

Alterung

Beva 371 wurde bisher intensiv getestet, negative Auswirkungen oder auch ein theoretisch gut denkbare Auswandern des Weichmachers Cellolyn 21 wurde bisher nicht festgestellt.³⁸⁸ Der Einsatz von BEVA 371 wird teilweise sehr kritisch betrachtet, da es ein Gemisch aus mehreren Materialien ist, von denen einige nicht alterungsbeständig sind (so neigt z.B. Keton N zu Quervernetzungen, erhöhter Polarität und Glibung). BEVA 371 glibt stark unter Lichteinfluss.³⁸⁹ Bei Versuchen von künstlicher Alterung kommt es zu Abspaltung von geringen Mengen Essigsäure.³⁹⁰ Laut Horie tritt

³⁷⁹ RAFT, RAFT 1973, S. 32.

³⁸⁰ BERGER 1976, S. 177.

³⁸¹ DOWN et al. 1996, S. 31.

³⁸² BERGER 1975, S. 127.

³⁸³ BERGER 1993, S. 114.

³⁸⁴ ROUX 1993, S. 106.

³⁸⁵ ROUX 1993, S. 106; LANZ 1996, S. 43.

³⁸⁶ BERGER 1975, S. 127.

³⁸⁷ BERGER 1975, S. 127; BERGER 1976, S. 177; RAFT, RAFT 1973, S. 33.

³⁸⁸ Freundliche mündliche Mitteilung von Prof. Dr. Jägers, FH Köln.

³⁸⁹ DOWN et al. 1996, S. 35.

³⁹⁰ DOWN et al. 1996, S. 28.

bei Paraffin und Polyethylen durch Alterung Photooxidation, Abbau, Quervernetzung, Brüchigwerden und Entfärbung auf.³⁹¹ Der pH-Wert bleibt auch nach künstlicher Alterung im Dunkeln um 7.5, bei Lichtalterung steigt er leicht an.³⁹² Tendenziell ist bei BEVA 371 eine Zunahme der Zugbeständigkeit durch Alterung zu konstatieren.³⁹³

4.3.10 Epoxidharz

Epoxidharze sind Polyether-Klebstoffe, die aus zwei Komponenten, einem so genannten Harz mit Epoxidgruppe und einem so genannten Härter, gemischt werden.³⁹⁴ Nach dem Mischen vernetzen die beiden Komponenten durch Polyaddition. Häufig sind zusätzlich Weichmacher und Füllstoffe enthalten.³⁹⁵

Für die Rissverklebung wurden bisher Araldit AY103/HY991,³⁹⁶ Araldit AW106/HY935U (= Uhu plus endfest)³⁹⁷, Araldit 2020³⁹⁸, Araldit AV100³⁹⁹ und Uhu plus schnelfest verwendet. Da in dieser Arbeit exemplarisch nur ein Epoxidharz getestet werden soll, fiel die Auswahl auf Uhu plus schnelfest, da es keine Weichmacher (wie z.B. Uhu plus endfest) enthält,⁴⁰⁰ und die Abbindezeit relativ kurz ist. Die Harzkomponente besteht aus Diglycidylether von Bisphenol A (aromatisches Epoxid), die Härterkomponente aus Polyoxypropylendiamin (mehrwertiges Amin). Füllstoffe und weitere Zusätze konnten nicht analysiert werden.⁴⁰¹

Name	Zusammensetzung	Härtungszeit	Verarbeitungszeit	Belastbarkeit
Araldite AY103/HY991	keine Angaben	15 Stunden	90 Minuten	je nach Material 3 N/mm ² bei Polycarbonat, 22 N/mm ² bei Edelstahl
Uhu plus endfest (= Araldite AW106/HY935U)	Diglycidylether von Bisphenol A, Fatty polyamide (high amine value), Dibutylphthalat, Silica	12 Stunden	ca. 2 Stunden	1,2 N/mm ² (höher durch Erwärmen während Härtung)
Araldite 2020	keine Angaben	16 Stunden	45 Minuten	je nach Material: 2,5 N/mm ² bei Polyamid, 26 N/mm ² bei Glas
Araldite AV100	Diglycidylether von Bisphenol A, Fatty polyamide (high amine value), Silica, 2,4,6-tris (dimethylaminomethyl) phenol (DMP30)	keine Angaben da nicht mehr erhältlich	keine Angaben da nicht mehr erhältlich	keine Angaben da nicht mehr erhältlich
Uhu plus schnelfest	Diglycidylether von Bisphenol A, Polyoxypropylendiamin, keine Weichmacher und Zusätze	30 Minuten	5 Minuten (3 Minuten bei Kleinstmengen)	1,9 N/mm ²

Tab. 6: Eigenschaften von bisher für die Rissverklebung verwendeten Epoxidharzen nach Angaben der Hersteller und DOWN 1984

³⁹¹ HORIE 1994, S. 87.

³⁹² DOWN et al. 1996, S. 24.

³⁹³ ERHARDS 1993, S. 78.

³⁹⁴ Die Epoxidharzchemie ist sehr vielfältig, da verschiedene Katalysatoren verwendet werden und kann daher im Rahmen dieser Arbeit nicht ausführlicher erläutert werden.

³⁹⁵ EIPPER 1993, S. 69.

³⁹⁶ NÄGLER 2005, S. 77.

³⁹⁷ Freundliche schriftliche Mitteilung von Martin Zunhamer, Köln 1993/94, S. 10.

³⁹⁸ PLÖTZ 2003, Teil 2, S. 10f.

³⁹⁹ SANDNER et al. 1990, S. 115.

⁴⁰⁰ DOWN 1984, S. 66.

⁴⁰¹ DOWN 1984, S. 66.

Adhäsion

Laut Habenicht verfügen Epoxidharze auf praktisch allen Werkstoffen über ausgezeichnete Haftungseigenschaften.⁴⁰² Damit sind sie auch für die Verklebung von wachsharzgetränkten Geweben und Synthesefasern geeignet.⁴⁰³ Epoxidharze haben ein besonders gutes Penetrationsvermögen, da sie vor dem Vernetzen aus vergleichsweise kleinen Molekülen bestehen. Bei einer Rissverklebung können die Fasern im Umkreis von 1mm unbeabsichtigt getränkt werden.⁴⁰⁴ Ein zu tiefes Eindringen in die Fasern könnte durch Anreicherung mit Füllstoffen oder Vorhärten der Mischung vermieden werden.

Kohäsion

Durch die Vernetzung und chemische Bindung haben Epoxidharze eine höhere Kohäsionsfestigkeit als die thermoplastischen Klebstoffe. Daher finden sie vor allem für Sonderfälle mit hohen Belastungen Verwendung, die z.B. bei Rissen in Bildecken, bei Großformaten und bei Stoß-auf-Stoß-Klebung auftreten können.⁴⁰⁵

Sie gehören zu den Klebstoffen mit der höchsten Klebkraft.⁴⁰⁶ Diese kann jedoch nur ausgebildet werden, wenn sich die Fadenenden während der Aushärtung in engem Kontakt befinden.⁴⁰⁷ Das liegt daran, dass der Klebstoff Brücken zwischen den Fasern bilden muss und diese umso stabiler sind, je kürzer die Brücken sind.

Durch den hohen Vernetzungsgrad besitzen Epoxidharzklebstoffe im Vergleich mit andern Klebstoffen nur ein begrenztes Verformungsvermögen, sie sind eher unflexibel und spröde.⁴⁰⁸

Epoxidharz wird für die Rissverklebung vor allem wegen seiner Steifheit geschätzt.⁴⁰⁹ Berger und Russell sind der Meinung, dass steife alte Bildschichtgefüge einen harten und steifen Klebstoff für die Rissverklebung brauchen und nur Epoxidharz ausreichend steif sei.⁴¹⁰ Nach Meinung von Cederholm ist eine harte Verklebung zudem notwendig, um ein Markieren zu vermeiden und damit sie nicht weicher ist als die darauf folgende Kittung, die sonst die Klebung dominieren würde.⁴¹¹ Young ist dagegen der Meinung, dass die Kohäsion etwas unterhalb der von Leinenfasern liegen sollte und außerdem eine gewisse Elastizität und Flexibilität des Klebstoffs vorhanden sein sollte.⁴¹²

Reaktion auf Klimaschwankungen

Bei Epoxidharz handelt es sich um reine räumlich vernetzte Struktur, die prinzipiell nur schwach durch Wasser und Lösungsmittel quellbar ist. Sie reagieren somit kaum auf Schwankungen der relativen Luftfeuchte. Es ist jedoch eine sehr langsame Wasserdampfdiffusion möglich.⁴¹³

Durch die Steifheit der Klebestellen wird das Ausdehnen und Schrumpfen der Leinenfasern bei Feuchteschwankungen behindert. Demnach sind die an die Klebestellen angrenzenden Gewebebereiche besonderen Belastungen ausgesetzt.

Löslichkeit / Reversibilität

Epoxide sind als Reaktionsharze im Prinzip unlöslich. Sie sind weder mit Wasser noch mit üblichen organischen Lösungsmitteln löslich oder entfernbar. Da sie auch thermisch nicht erweicht werden können, gelten sie als

⁴⁰² HABENICHT 1997, S. 24.

⁴⁰³ PLÖTZ 2003, Teil 2, S. 9.

⁴⁰⁴ ROUX 1993, S. 111.

⁴⁰⁵ SANDNER et al. 1990, S. 115; HEIBER 1996, S. 131f; PLÖTZ 2003, S. 9.

⁴⁰⁶ HABENICHT 1997, S. 251.

⁴⁰⁷ Freundliche schriftliche Mitteilung von Winfried Heiber, Dresden 2006.

⁴⁰⁸ HABENICHT 1997, S. 24.

⁴⁰⁹ ROUX 1993, S. 112.

⁴¹⁰ BERGER, RUSSELL 1993, S. 115f.

⁴¹¹ EIPPER 1993, S. 70.

⁴¹² YOUNG 2003, S. 56.

⁴¹³ Freundliche mündliche Mitteilung von Prof. Dr. Jägers, FH Köln.

irreversibel.⁴¹⁴ Eine Möglichkeit zur Entfernung ist die Quellung in heißem Wasserdampf, oder das Anquellen mittels Kompressen oder Gelen mit folgenden Lösungsmitteln: Tetrahydrofuran, Dimethylformamid, chlorierten Kohlenwasserstoffen, Pyridin, Dimethylsulfoxid, N-Methylpyrrolidon oder einem Aceton-Wasser-Gemisch.⁴¹⁵ Dabei muss darauf geachtet werden, dass das übrige Gemäldegefüge nicht belastet wird.

Alterung

Epoxidharze haben eine vergleichsweise geringe Alterungsbeständigkeit.⁴¹⁶ Oxidationsreaktionen, die meist photochemisch induziert sind, führen zu Gilbung, und Veränderungen der mechanischen Eigenschaften. Die Filme werden dabei deutlich spröder. Auch bei der Alterung im Dunkeln kommt es zu Vergilbungsreaktionen. Dabei zeigt Uhu plus schnellfest eine geringere Vergilbungsneigung als Uhu plus endfest.⁴¹⁷

Laut Heiber haben Epoxidharzverklebungen dagegen eine angemessene Alterungsbeständigkeit und halten auch nach 20 Jahren noch sehr gut.⁴¹⁸

Weitere Eigenschaften

Epoxidharze schrumpfen beim Aushärten beträchtlich. Sie reagieren stark polar und sind basisch.⁴¹⁹ Die aminhaltigen Härter der Epoxidharze sind giftig.⁴²⁰

Epoxidharze müssen ständig neu angemischt werden. Z.B. ist Uhu plus schnellfest nach fünf Minuten schon nicht mehr verwendbar. Kleine Mengen müssen laut Herstellerangaben innerhalb von drei Minuten verarbeitet werden.⁴²¹ Daher ist der Materialverbrauch recht hoch und die Handhabung aufwendig. Nach 72 Stunden wird die Endfestigkeit erreicht.⁴²² Theoretisch ist eine unendlich lange Zeit erforderlich, bis die Reaktion 100%ig abgelaufen ist.⁴²³

Ein zügiges und exaktes Arbeiten ist schwierig, da die Fadenenden bis zum endgültigen Härten nicht durch den Klebstoff zusammenhalten.⁴²⁴ Sie müssen daher mit Hilfsmitteln in Position gehalten werden, oder vor der Verklebung so miteinander verflochten sein, dass sie nicht auseinander rutschen können.

5 Zugversuche an Einzelfäden

Im Rahmen dieser Arbeit sollen Probeverklebungen zunächst nicht an Geweben, sondern an Leinenfäden durchgeführt werden. Dies scheint erforderlich, da sich die Kenntnis möglicher Klebstoffe für Rissverklebungen bislang im Anfangsstadium befindet (siehe Kapitel 2.2). Probeverklebungen an Fäden bedeuten die Untersuchung von kleinstmöglichen Einheiten. Demgegenüber würden Probeverklebungen an Geweben zusätzliche Variablen wie die Bindung, Umschlingungswinkel der Fäden und Spannungen durch den Webprozess in die Zugversuche einbringen, die eine Fehlinterpretation der Ergebnisse zur Folge haben könnten.

⁴¹⁴ ROUX 1993, S. 111; EIPPER 1993 S. 69; HEIBER 1996, S. 133; BECKER 2002, S. 28.

⁴¹⁵ HORIE 1994, S. 223; DERSCHAU, UNGER 1998, S. 488.

⁴¹⁶ ROUX 1993, S. 111; EIPPER 1993 S. 69.

⁴¹⁷ DOWN 1984, S. 68f.

⁴¹⁸ HEIBER 1996, S. 131.

⁴¹⁹ EIPPER 1993, S. 69.

⁴²⁰ PLÖTZ 2002, S. 61.

⁴²¹ UHU <www.uhu.de> (29.04.2008), s. Uhu plus schnellfest.

⁴²² UHU <www.uhu.de> (29.04.2008), s. Uhu plus schnellfest.

⁴²³ HABENICHT 1997, S. 16.

⁴²⁴ HEIBER 1996, S. 131.

5.1 Versuchsaufbau

Im ersten Teil der Versuche soll die Belastbarkeit der verklebten Fäden nach dreiwöchiger Trocknungszeit untersucht werden. Diese Wartezeit soll ein vollständiges Verdunsten und Aushärten der verschiedenen Klebstoffe gewährleisten. Diese ersten Versuche sollen von derselben Person durchgeführt werden, um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse sicherzustellen.

Danach sollen Verklebungen von mehreren Personen verglichen werden. Dazu werden Klebungen mit Klebstoffen durchgeführt, die sich im ersten Versuch als besonders geeignet herausgestellt haben.

Anschließend wird die Belastbarkeit der Verklebungen nach mehrmaligen Klimawechseln untersucht. Dazu werden die Fäden aufgespannt und in einem Klimaschrank wechselnden Temperaturen und Luftfeuchtigkeiten ausgesetzt (siehe Kapitel 5.1.3). Die darauf folgenden Versuche sollen die Veränderungen der Belastbarkeit in besonders trockenen oder feuchten Klimata untersuchen. Zum Abschluss wird überprüft, wie sich die Ergebnisse auf Fäden in einem Gewebeverband übertragen lassen.

Während des gesamten Prüfverfahrens wurde ein stabiles Raumklima nach DIN EN ISO 2062:1995 eingehalten. Abweichend von der Norm wurde eine relative Feuchte von 55 +/- 2% und eine Temperatur von 20 +/- 2 °C gewählt, weil diese den Klimabedingungen in den meisten Museen entsprechen.⁴²⁵

Es muss angemerkt werden, dass die Versuche nur eine eingeschränkte Aussagekraft haben, da die Belastung in recht kurzem Zeitraum ständig erhöht wird bis die Klebung versagt. In der Praxis kommen außer den dabei wirkenden kurzfristigen Spannungs- und Dehnungsmechanismen bei einer Rissverklebung am Gemälde der Faktor Zeit hinzu. Unter konstanter, lang andauernder Belastung kann es in Polymeren zu einem allmählichen Versagen durch „Kriechen“ oder „Fließen“ kommen (siehe Kapitel 4.1). Diese Eigenschaften werden von der Zugprüfmaschine nicht erfasst.

Die wichtige Frage, ob die Verklebungen bei konstanter Belastung oder Dehnung, wie sie an einem aufgespannten Leinwandgemälde auftreten, den Ansprüchen genügen, kann aus Zeit und Platzgründen in der vorliegenden Arbeit nicht untersucht werden, da für statische Versuche ein anderer Versuchsaufbau notwendig wäre.

Bei der Interpretation der Ergebnisse muss außerdem bedacht werden, dass der Zug bei diesen Versuchen nur axial auf die Probe wirkt und nicht biaxial wie im Gewebe. Die nachgestellten Spannungssituationen sind aus den oben genannten Gründen lediglich als Orientierung anzusehen.

5.1.1 Vorbereitung der Prüflinge

Da die Adhäsion zwischen Faser und Klebstoff durch die physikalischen und chemischen Eigenschaften des Fadenmaterials verändert werden kann, wurden alle Probeverklebungen an identischen Standard-Materialien durchgeführt - nur die Klebstoffe wurden verändert. In der Praxis können sich durch fortgeschrittenen Abbau von gealterten Leinenfasern oder Aufbereitungsunterschiede (siehe Kapitel 3) veränderte Oberflächen und dadurch andere Adhäsionseigenschaften als bei den Versuchen in dieser Arbeit ergeben. Auch kann es dazu kommen, dass die Fasern durch Alterung sehr brüchig werden und bei Belastungen vor der Verklebung reißen.

Aus Gründen der einfacheren Vergleichbarkeit der Messungen miteinander und ihrer Reproduzierbarkeit wurde entschieden, neue Leinenfäden zu verwenden, die jederzeit für Folgeversuche nachbestellt werden können.

Damit die Durchmesser der Prüflinge an der Klebefläche möglichst wenig variieren, sollte ein gleichmäßig dicker Faden verwendet werden.

⁴²⁵ In der Norm DIN EN ISO 2062:1995 werden 60% rF vorgegeben, deshalb wurde in diesen Versuchen der Wert auf die maximale empfohlene Luftfeuchte für Leinwandgemälde von 55% (HILBERT 1996, S. 181 und 185) gesenkt.

Die Suche nach einem solchen Faden war jedoch erfolglos, da es sehr aufwendig in der Herstellung wäre und bei Webereien von Leinwänden keinen Bedarf dafür besteht. Es wurde daher versucht, durch den Vergleich mehrerer Reinleinenfäden den gleichmäßigsten auszuwählen. Zusätzlich ergab sich das Problem verschiedener Schichten auf den Fäden, die teilweise nicht entfernbar sind (siehe Kapitel 9.5). Es handelt sich dabei teilweise um andere Materialien, als im üblichen Gemäldeaufbau zu finden sind.

Für die Prüflinge wurde ein Leinenfaden ausgesucht, der über die Firma H.D. Textiltrade, Mönchengladbach, unter dem Namen „Linen LEA 20 raw Nm12 Nr.115/2007“ bezogen werden kann. Durch Augenschein und durch Zugversuche konnte eine vergleichsweise hohe Gleichmäßigkeit festgestellt werden. Zudem ist nur eine zu vernachlässigende Menge einer Schlichte vorhanden. Diese besteht nach FTIR-Analysen aus Methylcellulose.⁴²⁶ Dieses dürfte die Adhäsion der Klebung nicht beeinträchtigen. Auf ein Waschen der Fäden wurde daher verzichtet.

Die Fäden haben eine Zugfestigkeit von 32 cN/tex⁴²⁷, eine Z-Drehung, einen mittleren Durchmesser von ca. 0,27 mm und eine Feinheit⁴²⁸ von 83 tex (12 Nm).⁴²⁹ Sie wurden auf etwa 30 cm Länge zugeschnitten, in der Zugmaschine wurden nur die mittleren 10 cm eingespannt.

Die Form der Fadenenden ist von besonderer Bedeutung für die Verklebung. Beim Reißen von Leinfäden entstehen stark divergierende Klebeflächen und somit starke Streuungen in den Messungen. Dagegen ist bei geschnittenen Fäden eine genau definierte Überlappung möglich und die Varianz der Klebeflächen geringer.⁴³⁰ Daher wurde entschieden, die Fäden zu schneiden und mit 1 mm Überlappung zu verkleben.⁴³¹

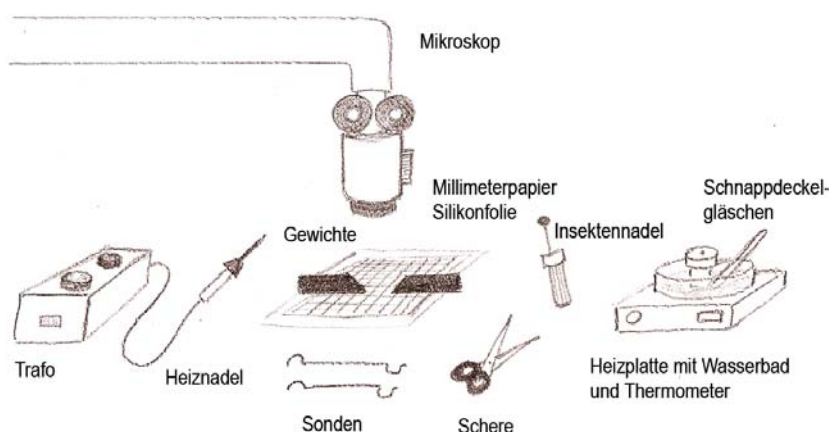


Abb. 5: Die Klebungen wurden mit folgenden Hilfswerkzeugen ausgeführt: Mikroskop mit 25-facher Vergrößerung, 2 gekrüpfte Zahnarztsonden zum Modellieren der Klebungen, Reibahlenhalter mit Insektennadel (so befestigt, dass das runde Köpfchen heraussteht) zum Auftrag der flüssigen Klebstoffe, regelbarer Engelbrecht Transformator mit Heiznadel (Ersa-Minor mit Miniheizschuhaufsatz Nr. 0042LD/SB) zum Trocknen der wässrigen Klebstoffe bzw. zum Schmelzen der Schmelzklebstoffe, Wärmeplatte mit Wasserbad und Thermometer zum Warmhalten der Störleimlösungen, Schnappdeckelgläser mit Loch im Deckel zur Klebstoffentnahme, Millimeterpapier mit 0,5 Millimeter-Kästchen mit Hostaphanfolie abgedeckt als Unterlage, Eisengewichte zur Fixierung der Fäden, Schwanenhalslampe und Schere.

Im ersten allgemeinen Versuch wurden pro Klebemittel jeweils 15-30 Fäden verklebt. Es wurde versucht, die Klebstoffmenge so zu dosieren, dass bei jeder Klebung mit demselben Klebstoff die gleiche Menge verwendet wurde. Eine gleiche Klebemittelmenge bei allen Klebstoffen zu verwenden war nicht möglich, da z.B. von einem dickflüssigen Klebstoff weniger benötigt wird als etwa von einem dünnflüssigen Klebstoff, der schneller eindringt. Am

⁴²⁶ Das FTIR-Spektrum ist Na-Carboxymethylcellulose (etwa Tylose C300) sehr ähnlich, zeigt jedoch leicht abweichende Signale bei den Wellenlängen 2899.79, 2849.34 und 1732.36. Dies weist auf eine geringere Polarität hin. Eventuell können Spuren eines Tensids dafür verantwortlich sein. Die Analysen wurden von Prof. Dr. Jägers, FH Köln durchgeführt.

⁴²⁷ Die Festigkeit (Zugkraft) von Fäden wird auf ihre Feinheit bezogen in cN/tex ausgedrückt.

⁴²⁸ Die Feinheitbezeichnung Tex (tex) gibt an, welche Masse in Gramm eine Längeneinheit von 1000 m hat. Die Feinheitbezeichnung Nm gibt an, wie viel Meter ein Gramm wiegen.

⁴²⁹ Frdl. schriftl. Mitteilung von H. Drießen, H.D. Textiltrade, Mönchengladbach, 27.3.2008.

⁴³⁰ BECKER 2002, S. 111.

⁴³¹ Laut HEIBER 2003 (S. 40) ist eine Überlappung von 0,5 mm ausreichend, um eine belastbare Verklebung zu erreichen.

erfolgreichsten bei den flüssigen Klebstoffen erwies sich die Methode, die Insektennadel oder ein Werkzeug, an dem der Klebstoff nicht durch seine Oberflächenspannung nach oben wandert, mit einer definierten Tiefe in den Klebstoff einzutauchen und dann eine definierte Zeit lang auf den Faden aufzusetzen (siehe Abb. 6). Eine noch genauere Dosierung wäre mit elektrischen Dosiergeräten möglich, die für diese Arbeit jedoch nicht zur Verfügung standen.



Abb. 6: Klebevorgang bei flüssigen Klebstoffen

Die Schmelzklebstoffe wurden mit subjektiv eingeschätzter angemessener Menge verwendet. Das genaue Vorgehen bei der Klebung mit Klebstoffmenge und Temperatureinstellung der Heiznadel sowie den Beobachtungen beim Kleben kann im Klebprotokoll (Kapitel 9.6) nachgelesen werden.

5.1.2 Zugprüfung

Der Zugversuch wird in Anlehnung an DIN EN ISO 1062 1995-05 durchgeführt. In einer Zwick-Universalprüfmaschine (Typ Z 2.5/TN1S mit 10N Messdose) werden die Prüflinge mit konstanter Verformungsgeschwindigkeit bis zum Bruch gedehnt.

Dafür wird ein klimatisierter Prüfling zunächst in den oberen Klemmbacken⁴³² der Maschine befestigt. Eine gewichtsgenormte Klammer von 1g (1cN) am unteren Fadenende des Prüflings erzeugt bei allen Prüflingen die gleiche Vorspannung, mit der sie in den unteren Klemmbacken eingespannt werden. Abweichend von der Norm wird eine Einspannlänge von 100 mm verwendet. Die Klebung befindet sich jeweils in der Mitte des eingespannten Bereichs.

Die Prüfmaschine wird ohne Vorspannkraft eingestellt, d.h. die Prüfung wird sofort am Nullpunkt beginnend gestartet. Mit Beginn des rechnergesteuerten Versuchsablaufs bewegt sich die obere Klemme von der unteren feststehenden Klemme mit einer Geschwindigkeit von 20 mm/min weg. Der Versuch endet mit dem Reißen oder Bruch des Prüflings und dem Zurückfahren der oberen Klemme in ihre Ausgangsposition.

⁴³² Die kleinen Klemmbacken wurden mittels selbstklebendem Klebeband mit Schmirgelpapier Korngröße 180 versehen, damit die Backen auch die unverklebten Fäden (Nullproben) beim Zugversuch halten konnten, ohne dass die Fäden bei hohem Zug durch die Klemmen rutschen.

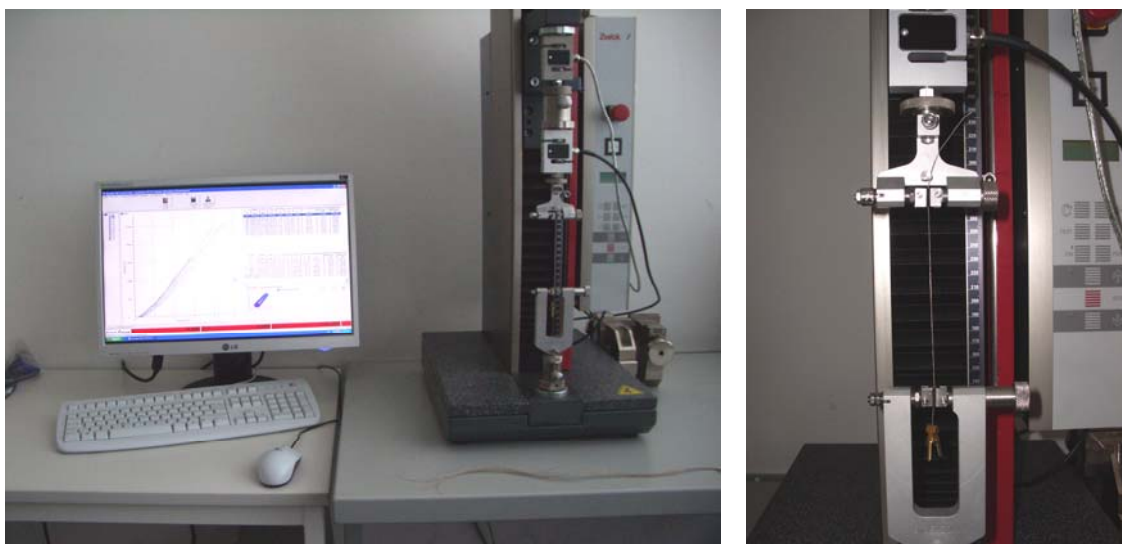


Abb. 7 und 8: links Prüfplatz der Zugmaschine mit direkter PC-Auswertung, rechts Einspannvorrichtung mit eingespanntem Prüfling und genormter Gewichtsklammer am unteren Ende

Der Prüfling wird durch den Zug bis zum Reißen bzw. Bruch stetig zunehmend gedehnt. Dabei wird die dafür erforderliche Zugkraft in Abhängigkeit von der Verlängerung der Probe gemessen. Je nach Material entsteht so ein charakteristisches Zugkraft-Dehnungs-Diagramm. Aus dem Diagramm lassen sich Kennwerte wie die Höchstzugkraft⁴³³ und Höchstzugkraftdehnung⁴³⁴ ermitteln, die für einen Vergleich der Klebstoffe herangezogen werden können. Bei der Interpretation muss bedacht werden, dass die Fadeneigenschaften mit gemessen werden.

Die Zugmaschine errechnet automatisch die Mittelwerte sowie den Variationskoeffizienten. Darüber hinaus wird auch die Messunsicherheit angegeben. Sie ist für die Aussagekraft der Prüfergebnisse von Bedeutung, da durch sie alle zufälligen und systematischen Fehler einer Prüfung erfasst werden. Sie gibt an, in welchem Bereich der „wahre Mittelwert“ bei einer statistischen Sicherheit von 95% zu erwarten ist.

5.1.3 Klimabelastung–Einfluss von Feuchtigkeitsschwankungen

Für die Fadenverklebungen ist das Langzeitverhalten von besonderer Bedeutung. Als hauptsächliche Ursache für eine Schwächung der Klebeverbindung von Fadenverklebungen können Klimaschwankungen und wechselnde Zugbelastungen im textilen Träger angesehen werden. Eine Belastung durch UV-Strahlung ist in den meisten Fällen nicht gegeben. Selbstverständlich bedürfen Rückschlüsse aus verschärften Kurzzeitprüfungen auf das Langzeitverhalten, wie sie in dieser Arbeit aus Zeitgründen angewendet werden, einer besonders kritischen Betrachtung.

Die Belastung unter wechselnden Temperaturen und relativer Luftfeuchte wird auch als dynamische Alterung bezeichnet. Es handelt sich um ein bisher nicht genormtes Verfahren, das nach Käßberger et al. realistische Annäherungen an Alterungsprozesse von Papier und Karton erlaubt und daher in der Papierindustrie und -Restaurierung eingesetzt wird.⁴³⁵ Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde das Verfahren jedoch hauptsächlich angewendet, um den Einfluss von Feuchtigkeitsschwankungen auf die Belastbarkeit der Klebungen herauszufinden. Mit steigendem

⁴³³ Die Höchstzugkraft (angegeben in cN) ist die maximal ausgeübte Kraft, die zum Zerreißen einer Probeverklebung führt. Sie ist demnach ein Maß für die kohäsive Festigkeit und das Adhäsionsvermögen eines Klebstoffs.

⁴³⁴ Die Höchstzugkraftdehnung (angegeben in % der Ausgangslänge) entspricht dem Maß für die maximale Dehnung, die zum Zerreißen einer Verklebung führt.

⁴³⁵ KÄSSBERGER et al. 1998, S. 529f.

Wassergehalt ändern sich die mechanischen Eigenschaften der meisten Klebstoffe. Normalerweise nehmen Elastizität und Dehnbarkeit in gequollenem Zustand zu, während Festigkeit, Härte und Sprödigkeit abnehmen.

Bei langkettigen Molekülen mit polaren Gruppen, wie z.B. dem Glutin, ist dieses Verhalten sehr ausgeprägt.⁴³⁶ Laut Habenicht stellt die Diffusion von Feuchtigkeit in die Klebefuge den stärksten Schädigungsmechanismus dar, da es aufgrund der Kleinheit des Wassermoleküls mit gleichzeitig hohem Dipolmoment zu einer „Konkurrenzadsorption“ gegenüber den polaren Gruppen der Klebschichtmoleküle kommen kann.⁴³⁷ Gleichzeitig bewirkt die Feuchtigkeit ein Quellen der Leinenfasern, wodurch sich die Fäden aufdrehen und verlängern, und dadurch die Spannung nachlässt. Während der Trocknung wird wieder ein höherer Zug auf die Verklebungen ausgeübt.

Für die Klimabelastung wurden die Prüflinge nach einer Wartezeit von drei Wochen mit einer Vorspannung von 10g (mittels Klemmgewicht am unteren Ende) mit 20 cm Länge auf hölzerne Keilrahmen aufgespannt. Die Keilrahmen wurden in einen Klimaschrank der Firma Weiss Umwelttechnik GmbH, Gerätetyp UV 200SB, gebracht. Dort wurden die Prüflinge sechs Wochen lang einem Klimawechsel von 25 auf 85% relativer Feuchte in Abstand von jeweils 2,5 Stunden unterzogen. Die Temperatur lag konstant bei 30 °C. Die Prüflinge durchliefen insgesamt ca. 400 Zyklen. Anschließend wurden sie bei 55% rF und 20 °C der Zugprüfung unterzogen.

Einzelfadenverklebungen bei Becker zeigten bei unterschiedlichen Klimaverhältnissen stark divergierende Werte.⁴³⁸ Daher wurde auch eine Testreihe zur Ermittlung des Einflusses der jeweils gegenwärtigen relativen Feuchte auf die Verklebungen durchgeführt. Zu diesem Zweck wurden je 15 verklebte Prüflinge nach der 6-wöchigen dynamischen Alterung bei einer relativen Feuchte von 25% beziehungsweise 93% geprüft.⁴³⁹ Das Klima mit 93% relativer Feuchtigkeit wurde über eine gesättigte Kaliumsulfatlösung erzeugt. Das Raumklima für die bei 93% rF konditionierten Prüflinge wurde so feucht wie möglich, auf 75% rF eingestellt, damit die Abgabe von Feuchtigkeit aus dem Prüfling möglichst langsam erfolgt.

Die 25%ige Feuchtigkeit wurde durch getrocknetes Silicagel erzeugt. Beim Prüfen konnte nur schwer ein trockenes Raumklima erreicht werden. Daher musste die Zugprüfung bei 40 % rF durchgeführt werden.

⁴³⁶ SCHAIBLE 1987, S. 89.

⁴³⁷ HABENICHT 1997, S. 244f.

⁴³⁸ BECKER 2002, S. 61.

⁴³⁹ Die Prüflinge wurden jeweils 72 Stunden an das Klima angeglichen.

5.2 Zugbelastung der ausgewählten Klebstoffe im Vergleich

Das Hauptaugenmerk bei der Auswertung der Versuche lag auf der Höchstzugkraft.⁴⁴⁰ Außerdem wurden die Verarbeitbarkeit, das Eindring-verhalten und die farbliche Veränderung durch die Klebstoffe subjektiv während des Klebevorgangs beurteilt (siehe Kapitel 9.6). Zusätzlich wird in signifikanten Fällen der Verlauf der Zug-Dehnungskurve betrachtet. Im Bereich zwischen 280 und 300 cN Spannung gibt es bei allen Prüflingen eine kleine, maschinenbedingte Stufe im Kurvenverlauf.

Die Zugbelastbarkeit der Klebungen wird mit dem Mittelwert angegeben (siehe Diagramm 1). Alle Prüflinge rissen an der Klebestelle. Das bedeutet, dass die Messergebnisse tatsächlich als Eigenschaft der Klebstoffe gewertet werden können. Zusätzlich wird der Bereich angegeben, in dem mit 95%iger Wahrscheinlichkeit eine Verklebung mit diesem Klebstoff liegen wird. Die Angabe von 95%igen Wahrscheinlichkeiten ist in der statistischen Auswertung üblich, da prinzipiell keine Aussagen über eine 100%ige Wahrscheinlichkeit gemacht werden können. Eine 95%ige Wahrscheinlichkeit bedeutet, dass nach den vorliegenden Versuchen bei Klebungen mit einem gleichen Klebstoff und gleichem Fadenmaterial mit hoher Wahrscheinlichkeit (95 von 100 Fällen) ein Ergebnis in diesem Bereich erwartet werden darf. Abweichungen können jedoch nicht ausgeschlossen werden. Soll eine höhere Wahrscheinlichkeit angegeben werden (bis zu 99,9 % möglich), wird der Bereich, in dem die Ergebnisse erwartet werden können, entsprechend größer (Er muss sogar größer sein als die bei 15 Prüflingen vorliegenden Ergebnisse!). Die Ergebnisse wären dadurch schlechter vergleichbar, weil dann alle Erwartungsbereiche mehr oder weniger gleich sein würden.

Der Variationskoeffizient⁴⁴¹ beschreibt, um wie viel Prozent die Werte um den Mittelwert schwanken, er gibt also an, wie groß die Schwankungen bei den Ergebnissen sind. Insgesamt kommt es zu recht hohen Schwankungen innerhalb der einzelnen Testreihen, was sich in Variationskoeffizienten zwischen 17 und 53% äußert (siehe Diagramm 2). Dies liegt unter anderem an den Schwankungen im Ausgangsmaterial, welches z.B. in der Zugbeständigkeit um 15% variiert. So haben die Fäden leicht unterschiedliche Durchmesser, wodurch unterschiedlich dicke Klebungen entstehen, und auch unterschiedlich viele Fasern für die Verbindung zur Verfügung stehen. Eine weitere Ursache kann die Klebemittelmenge sein, bei der zwar versucht wurde, immer die gleiche definierte Menge aufzutragen, es jedoch trotzdem zu minimalen Schwankungen kommen kann. Auch die Temperatur der Heiznadel kann im Verlauf der Klebungen trotz gleich bleibender Einstellung leicht variieren und damit die Qualität der Klebung beeinflussen. Hinzu kommen die Sorgfalt bei der Verklebung und die Art des Zusammenfügens der Fasern, die je nach dem Zustand des Fadens an der Klebestelle leicht unterschiedlich ausfiel. Bei zu hohen Schwankungen wurde die Testreihe wiederholt, um aussagekräftige Ergebnisse zu erlangen.

⁴⁴⁰ Gemessen wurden außerdem das E-Modul, die Dehnung bei Erreichen der Höchstzugkraft, die Zugbelastung, die zum ersten Bruch führt, die Dehnung am ersten Bruch, sowie die Kraft, die für eine Dehnung von 0,5%, 1% und 2% aufgewendet werden muss. Diese Daten werden jedoch nicht ausgewertet, da sie den Umfang dieser Arbeit deutlich übersteigen würden. Die Datensätze für eine weiterführende Auswertung befinden sich im Anhang (Kapitel 9.8). Bei der Auswertung von E-Modul und der Dehnungswerte sollte unbedingt bedacht werden, dass immer Garn und Klebestelle zusammen belastet werden und die Dehnung, genau wie die Elastizität, sich nur schwer auseinanderdividieren lässt.

⁴⁴¹ Der Variationskoeffizient ist die Standardabweichung (Maß für die Schwankungen oder Streubreite einer Probenreihe. Sie gibt die durchschnittliche Entfernung vom Mittelwert an) dividiert durch den Mittelwert. Er ermöglicht den Vergleich von Streuungswerten mit unterschiedlich großem Mittelwert.



Diagramm 1: Höchstzugkraft der Klebungen im Vergleich



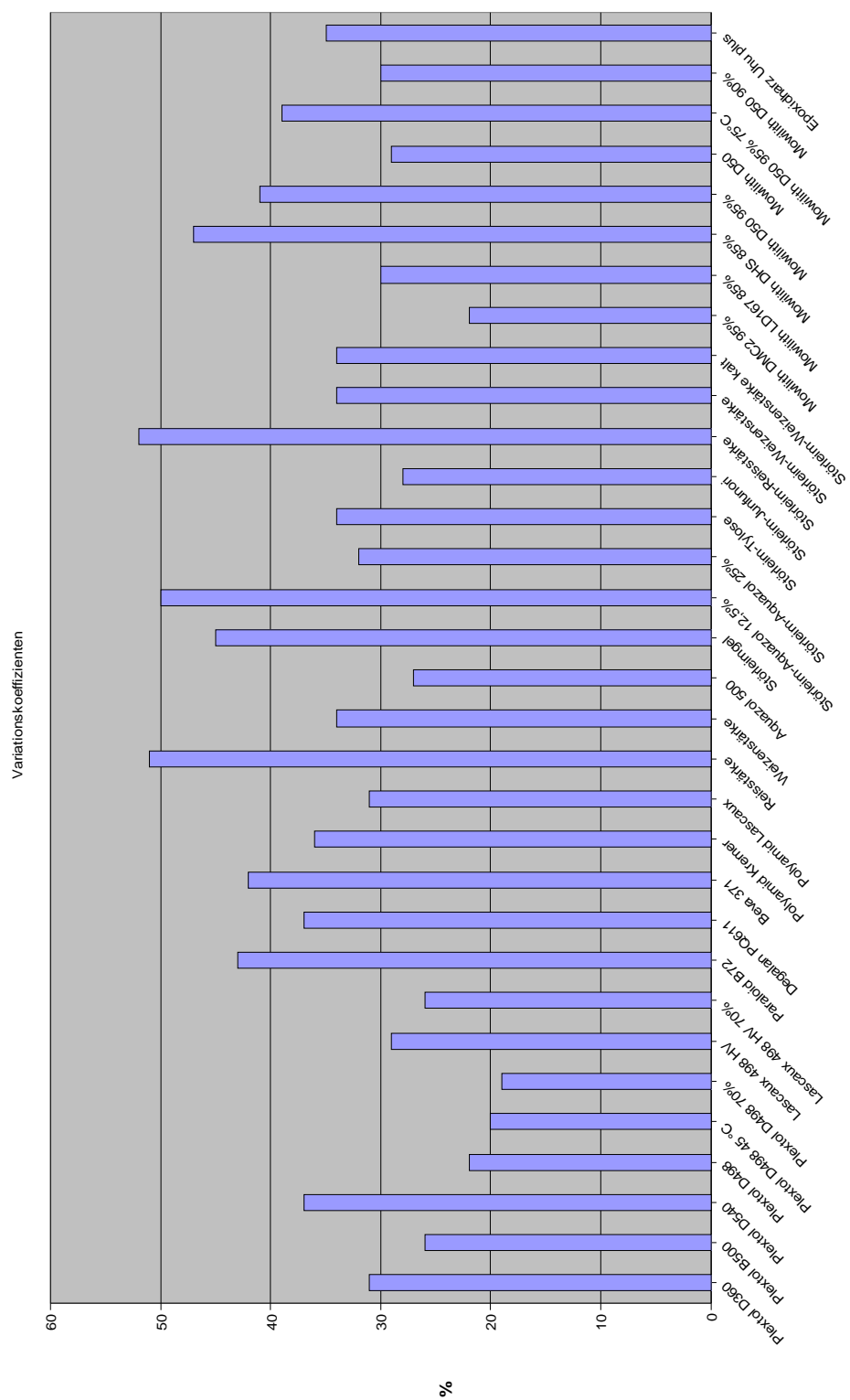


Diagramm 2: Variationskoeffizient der Klebungen im Vergleich

5.2.1 Acryldispersionen

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Zugbelastungstests an Klebungen mit Acryldispersionen vorgestellt. Anschließend erfolgt eine kurze Zusammenfassung und ein Vergleich der Ergebnisse der Klebungen mit Acryldispersionen.

Plextol D360

Plextol D360 dringt eher schlecht zwischen die Fasern und bildet sehr schnell „Häutchen“ an der Oberfläche, die die Adhäsion erschweren. Das Modellieren der Klebung ist daher schwierig. Beim Trocknen der Klebung mit der Heiznadel bei 50 °C klebte Plextol D360 zäh an der Nadel. Durch die Erwärmung mit der Siegeltemperatur kommt es zu einer Farbtonvertiefung an der Klebestelle, die auch nach dem Erkalten bestehen bleibt. Bei Verklebungen von Plextol D360 können mit 95%iger Wahrscheinlichkeit Zugbeständigkeiten zwischen 98 und 144 cN erwartet werden. Die Belastbarkeit der Klebungen ist damit sehr gering. Die Werte sind über diesen Bereich gleichmäßig verteilt. Die Zug-Dehnungs-Kurven zeigen einen ähnlichen Kurvenverlauf (siehe Diagramm 3). Der Mittelwert liegt bei 121 cN, der Variationskoeffizient beträgt 31%. Am Abfall der Kurven nach einem Höhepunkt ist zu sehen, dass die Klebungen nach dem Erreichen der Höchstzugkraft weiter gedehnt werden, wozu aber dann weniger Kraft nötig ist.

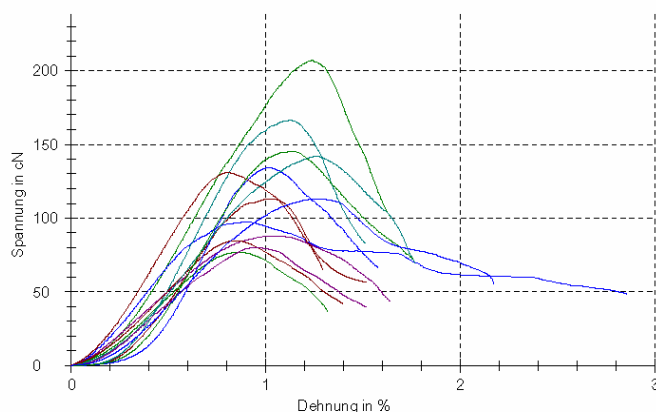


Diagramm 3: Zug-Dehnungs-Diagramm der Klebungen mit Plextol D360

Plextol B500

Plextol B500 dringt deutlich schneller und tiefer in die Fasern ein als die anderen Acryldispersionen. Da auch hier der Trockenprozess an der Oberfläche der Dispersion sofort einsetzt und sich dadurch rasch „Häutchen“ bilden, welche die Adhäsion beeinträchtigen, ist ein besonders rasches Vorgehen bei der Klebung nötig. Die Farbtonvertiefung nach dem Erwärmen mit der Heiznadel ist geringer als bei Plextol D360.

Bei Klebungen mit Plextol B500 kann mit 95%iger Wahrscheinlichkeit mit Höchstzugkraftbelastungen zwischen 189 und 252 cN gerechnet werden. Die Werte sind in diesem Bereich gleichmäßig verteilt, der Mittelwert liegt bei 221 cN, der Variationskoeffizient ist mit 26% vergleichsweise niedrig. Dies könnte an der niedrigen Viskosität (siehe Kapitel 4.3.7) liegen, die für ein gleichmäßiges Eindringen in die Fasern sorgt. Auch hier kommt es nach Erreichen der Höchstzugkraft zu einer weiteren Dehnung, die weniger Kraftaufwand braucht. Dieser Bereich ist jedoch kürzer als bei Plextol D360. Die Dehnbarkeit ist insgesamt deutlich geringer als bei Plextol D360.

Plextol D540

Mit Plextol D540 wird eine gute Anfangshaftung der Fasern erreicht. Der Klebstoff trocknet jedoch sehr schnell und kann beim weiteren Trocknen mit Hilfe der Heiznadel spröde Flocken zwischen den Fasern bilden. Es kommt zu einer leichten Farbtonvertiefung an der Klebestelle.

Die Klebungen mit Plextol D498 können mit 95%iger Wahrscheinlichkeit mit Zugkräften zwischen 289 und 396 cN belastet werden. Die Werte sind in diesem Bereich gleichmäßig verteilt, der Mittelwert liegt bei 343 cN. Der Variationskoeffizient beträgt 37%, ist also höher als bei den übrigen Acryldispersionen. Die Testreihe wurde daher wiederholt. Dabei ergaben sich sehr ähnliche Resultate. Nach dem Erreichen der Höchstzugkraft kann die Klebung nur noch sehr geringfügig bei abfallender Kraft weiter gedehnt werden (siehe Diagramm 4).

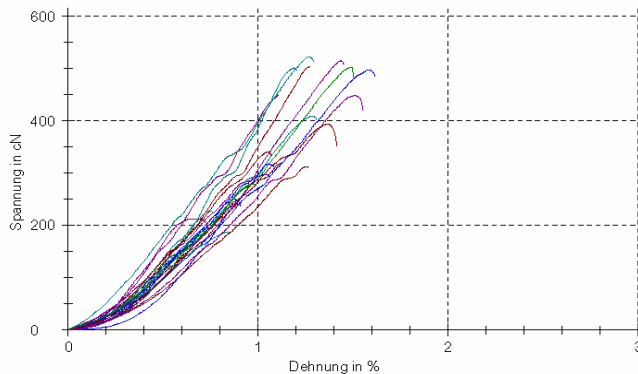


Diagramm 4: Zug-Dehnungs-Diagramm der Klebungen mit Plextol D540

Plextol D498 (Heiznadeltemperatur 65 °C)

Die Art des Eindringverhaltens von Plextol D498 liegt zwischen dem von Plextol D360 und B500. Es werden im Vergleich weniger schnell „Häutchen“ gebildet und die Verarbeitung ist dadurch etwas einfacher. Auch hier kommt es zu einer Farbtonvertiefung während der Trocknung mit Hilfe der Heiznadel.

Klebungen mit Plextol D498 halten mit 95%iger Wahrscheinlichkeit Belastungen zwischen 239 und 307 cN aus. Die Werte sind über diesen Bereich recht gleichmäßig verteilt, der Mittelwert liegt bei 273 cN. Der Variationskoeffizient beträgt 22%, ist also sehr niedrig. Das bedeutet, dass die Klebungen sehr einheitlich sind. Nach dem Erreichen der Höchstzugkraft kommt es auch bei diesem Klebstoff noch zu einer geringen Dehnung bei abfallender Kraft.

Plextol D498 (Heiznadeltemperatur 45 °C)⁴⁴²

Die Klebungen mit Plextol D498 unterhalb der Siegeltemperatur von ca. 65 °C gestalten sich schwierig, da das enge Zusammenfügen, das für eine gute Adhäsion und Kohäsion des Klebstoffs nötig ist, über den Druck der Heiznadel hergestellt werden muss. Die Farbtonvertiefung ist geringer als bei wärmer getrockneten Klebungen. Bei Verklebungen von Plextol D498 mit einer Heiznadeleinstellung von 45 °C (unterhalb der Siegeltemperatur) können mit 95%iger Wahrscheinlichkeit Zugbeständigkeiten zwischen 178 und 230 cN erwartet werden. Die Werte sind über diesen Bereich gleichmäßig verteilt und zeigen einen ähnlichen Kurvenverlauf. Der Mittelwert liegt bei 204 cN. Es werden somit etwas geringere Zugfestigkeiten als bei einer Verklebung mit Siegeltemperatur erreicht. Der Variationskoeffizient beträgt 20%. Er ist somit recht niedrig, was auf eine gleichmäßigere Klebung schließen lässt. Wie bei den anderen Acryldispersionen ist auch hier am Abfall der Kurven nach einem Höhepunkt zu sehen, dass nach dem Erreichen der Höchstzugkraft die Klebungen mit weniger Kraft weiter gedehnt werden.

⁴⁴² Die niedrige Temperatur wurde aufgrund der freundlichen mündlichen Mitteilung von Dipl. Rest. Petra Demuth, FH Köln, getestet, dass für die Klebung mit Acryldispersionen keine Erreichen der Siegeltemperatur nötig ist und die Heiznadel wie bei der Störleim-Kleister-Mischung nur zum schnelleren Trocknen bei 45 °C dient.

Plextol D498 verdünnt

Durch das Verdünnen der Dispersion in demineralisiertem Wasser (5:2)⁴⁴³ kommt es zu einem schnellen, teilweise zu tiefen Eindringen. Es ist daher schwierig, die Fasern an der Klebestelle zu modellieren, bevor der Klebstoff eingezogen ist. Mit der Heiznadel ist jedoch auch im Anschluss durch den hohen Feuchtigkeitsgehalt der Klebung ein präzises Formen möglich. Die Farbtonvertiefung ist geringer als bei unverdünntem Plextol D498.

Mit verdünntem Plextol D498 werden mit 95%iger Wahrscheinlichkeit Zugfestigkeiten zwischen 181 und 223 cN erreicht. Die Werte liegen bis auf drei Messungen im oberen Bereich sehr eng beieinander, der Variationskoeffizient ist entsprechend niedrig mit 19%. Im Durchschnitt werden 202 cN als Höchstbelastung erreicht. Die Klebungen halten, vergleichbar mit dem bei 45 °C getrockneten Plextol D498, weniger Zugbelastung aus als unverdünntes Plextol D498. Der Abfall der Zug-Dehnungs-Kurve ist kürzer und steiler als bei den Klebungen mit unverdünntem Klebstoff.

Lascaux 498HV

Die mit Acrylsäure verdickte Dispersion Lascaux 498HV trocknet deutlich langsamer als unverdickte Dispersionen. Daher tritt keine störende Häutchenbildung auf, die Klebung kann präzise modelliert werden. Der Klebstoff dringt durch die Verdickung allerdings nicht gut ein und sitzt eher zwischen den Fasern. Durch das Trocknen mit der Heiznadel bei der Siegeltemperatur von 65 °C kommt es zu einer Farbtonvertiefung.

Klebungen mit der verdickten Acryldispersion Lascaux 498HV können mit 95%iger Wahrscheinlichkeit Zugbelastungen zwischen 239 und 335 cN aushalten, bevor sie reißen. Die Werte sind in diesem Bereich gleichmäßig verteilt, der Mittelwert liegt bei 287 cN. Es werden also leicht höhere Werte als bei Plextol D498 erreicht. Dies kann daran liegen, dass die Häutchenbildung durch das Verdickungsmittel verzögert wird und dadurch mehr Zeit zum Modellieren der Klebung bleibt. Eine weitere Ursache könnte sein, dass aufgrund der höheren Viskosität mehr Klebstoff verwendet wurde. Der Variationskoeffizient beträgt 29%. Eventuell wurde es durch die bessere Modelliermöglichkeit durch die langsamere Trocknung und ausbleibende Häutchenbildung wieder ausgeglichen. Der Verlauf der Zug-Dehnungskurve ist vergleichbar mit Plextol D498.

Lascaux 498HV verdünnt

Der in demineralisiertem Wasser verdünnte Klebstoff (5:2)⁴⁴⁴ dringt sehr schnell und tief ein. Dadurch wird die Anfangshaftung erschwert, erst beim Ansiegeln bei 65 °C mit der Heiznadel ist ein gutes Formen der Fasern möglich. Durch die langsamere Trocknung ist ein noch präziseres Formen als beim unverdünnten Klebstoff möglich. Auch hier kommt es durch die Erwärmung zu einer Farbtonvertiefung.

Mit verdünntem Lascaux 498HV können mit 95%iger Wahrscheinlichkeit Zugbelastbarkeiten zwischen 110 und 152 cN erreicht werden. Der Mittelwert liegt bei 131 cN, also nur etwa halb so hoch wie bei der unverdünnten Dispersion, aber deutlich geringer als bei verdünntem Plextol D498. Die Werte sind gleichmäßig verteilt, der Variationskoeffizient liegt bei 26%. Die Klebungen werden also durch das Verdünnen gleichmäßiger.

Durch die Verdünnung ergeben sich kürzere und steiler ansteigende Zug-Dehnungskurven, die nur teilweise nach Erreichen der Höchstzugkraft abfallen.

⁴⁴³ Diese Verdünnung wird von BECKER 2002 (S. 144) als am besten geeignet für hoch-viskose Acryldispersionen für die Rissverklebung angegeben. Im Vergleich mit Lascaux 498HV soll in dieser Testreihe auch Plextol D498 in gleichem Maß verdünnt werden.

⁴⁴⁴ Diese Verdünnung wird von BECKER 2002 (S. 144) als beste Verdünnung für hochviskose Acryldispersionen für die Rissverklebung angegeben.

Zusammenfassung der Zugtests an Klebungen mit Acryl-dispersionen

Generell weisen die Klebungen mit Acryldispersionen nur sehr geringe Zugfestigkeiten auf. Sie sind teilweise geringer als bei Klebungen mit Stärkekleistern (siehe Kapitel 5.2.3).

Schwierigkeiten ergeben sich bei der Verarbeitung durch die schnelle ober-flächige Trocknung und die damit verbundene „Häutchenbildung“, die eine gute Adhäsion verhindert. Durch die Zugabe von geringen Mengen Wasser kann die erforderliche Verarbeitungsgeschwindigkeit reduziert werden, dies empfiehlt sich jedoch aufgrund der gleichzeitig erfolgenden Abnahme der Zugbeständigkeit nicht. Bei den mit Acrylsäure verdickten Typen stellt sich das Problem der Trocknung nicht, da keine Häutchenbildung erfolgt und die Trocknung erst durch die Erwärmung mit der Heiznadel eintritt.

Die höchste Zugfestigkeit wird von Typen mit hohem Glasübergangspunkt (T_g) erreicht. So kann Plextol D540 die höchste Zugbelastung aushalten, gefolgt von Lascaux 498HV und Plextol D498. Die Werte der beiden letztgenannten liegen sehr dicht beieinander, obwohl Lascaux 498 deutlich hochviskoser ist (siehe Tab. 4). Dies hatte zur Folge, dass der Klebstoff nicht so gut zwischen die Fasern dringen konnte. Das Verdickungsmittel verzögerte aber andererseits die Trocknung und „Häutchenbildung“ und ließ somit mehr Zeit zum Modellieren der Fäden. Dadurch lässt sich die geringfügig niedrigere Zugbelastbarkeit im Vergleich zu Plextol D498 erklären. Wird Plextol D498 mit Wasser verdünnt, sinkt die Belastbarkeit um ein Viertel. Wird dagegen das mit Acrylsäure angedickte Lascaux 498HV verdünnt, reduziert sich dessen Belastbarkeit um mehr als die Hälfte. Die von Becker empfohlene Verdünnung hochviskoser Typen ist demnach für belastete Klebestellen nicht geeignet.⁴⁴⁵ Wird Plextol D498 mit einer Lötnadel unter der Siegeltemperatur von 65 °C getrocknet, sinkt die Zugbeständigkeit der Klebung etwa auf das gleiche Niveau einer verdünnten Dispersion.

Plextol B500 zeigt eine deutlich geringere Belastbarkeit als Plextol D498. Eine Ursache dafür könnte sein, dass Plextol B500 einen geringeren Glas-übergangspunkt als Plextol D498 hat und daher geringeren Belastungen widerstehen kann. Außerdem bilden sich sehr schnell „Häutchen“, die eine gute Adhäsion verhindern.

Plextol D360 hat wie erwartet die geringste Zugbeständigkeit unter den Acrylaten, da es einen sehr niedrigen Glasübergangspunkt besitzt und daher bei Raumtemperatur weich und leicht verformbar ist und Zugkräften nur wenig Widerstand leisten kann.

Soll eine Acryldispersion für eine Rissverklebung verwendet werden, empfehlen sich Plextol D540 oder Lascaux 498HV. Aufgrund der niedrigen Belastbarkeit wurden die Acryldispersionen für die Folgeversuche nicht weiter verwendet.

5.2.2 Schmelzklebstoffe

Im Folgenden werden die Zugbelastungstests der Klebungen mit Beva 371, Paraloid B72, Degalan PQ611 und den Polyamidpulvern der Firmen Lascaux und Kremer-Pigmente vorgestellt.

Paraloid B72

Der Klebstoff muss zunächst mit der Heiznadel von einem Granulat-Korn abgeschmolzen und dann zwischen den Fadenenden platziert werden. Dabei müssen die Fasern mithilfe der Heiznadel und einer Sonde modelliert werden. Bei

⁴⁴⁵ In Versuchen von BECKER 2002 (S. 144) ist Testsieger für die Rissverklebung von Leinenfäden an textilen Objekten eine Mischung aus Lascaux 360HV und 498HV (1:1), 10:4 in demineralisiertem Wasser verdünnt.

der höchsten Einstellung der Heiznadel⁴⁴⁶ zieht Paraloid B72 immer noch zähe Fäden. Die Verarbeitung ist daher schwierig und benötigt einige Übung.

Die Klebungen mit Paraloid B72 als Schmelze reißen mit 95%iger Wahrscheinlichkeit bei Zugbelastungen zwischen 236 und 334 cN. Aufgrund des hohen Variationskoeffizienten von 42% wurde die Testreihe wiederholt. Die Ergebnisse sind vergleichbar mit dem ersten Versuchsdurchlauf. Die Werte sind gleichmäßig verteilt, sodass eine Ursache für die hohe Varianz nicht ermittelt werden konnte. Gründe können eventuell eine schwankende Temperatur der Heiznadel oder eine unterschiedliche Verweildauer der Heiznadel an der Klebestelle sein. Der Mittelwert liegt bei 285 cN. Die Klebungen reißen meist kurz nach dem Erreichen der Höchstzugkraft, das bedeutet, dass nur noch wenig Dehnung nach dem Erreichen der Höchstzugkraft stattfindet.

Degalan PQ611

Die Vorgehensweise bei den Verklebungen mit Degalan PQ611 entspricht den Klebungen mit Paraloid B72. Auch dieser Schmelzklebstoff ist bei der höchsten möglichen Temperatureinstellung der Heiznadel⁴⁴⁷ sehr zäh, dadurch schlecht dosierbar und die Verteilung zwischen den Fasern der Fadenenden bereitet Schwierigkeiten.

Bei Klebungen mit Degalan PQ611 kann mit 95%iger Wahrscheinlichkeit mit Höchstzugkraftbelastungen zwischen 152 und 207 cN gerechnet werden. Die Werte sind in diesem Bereich gleichmäßig verteilt, der Mittelwert liegt bei 179 cN, also niedriger als bei Paraloid B72. Der Variationskoeffizient liegt bei 37%. Die Verklebungen reißen mit dem Erreichen der Höchstzugkraft.

Beva 371

Unter den Schmelzklebstoffen ist Beva 371, von einer als Röllchen aufgerollten Folie abgeschmolzen, vergleichsweise einfach zu applizieren. Der Klebstoff zieht leicht Fäden, ist mit etwas Übung jedoch gut handhabbar. Er dringt besser zwischen die Fasern als Degalan PQ611 und Paraloid B72. Durch das Schmelzen kommt es zu einer Verdunkelung an der Klebestelle.

Die Klebungen mit Beva 371 widerstehen mit 95%iger Wahrscheinlichkeit einer Zugkraft von 117 bis 192 cN. Es gehört somit zu den Klebstoffen mit der geringsten Zugbeständigkeit. Der Mittelwert liegt bei 154 cN, die meisten Werte liegen jedoch entweder im oberen oder im unteren Viertel und nicht beim Mittelwert. Der Variationskoeffizient ist daher hoch und beträgt 42%. Nach dem Erreichen des Höchstkraftpunktes ist der Klebstoff bei rasch abfallender Spannung weiter dehnbar.

Polyamidpulver (Kremer)

Das Polyamidpulver wurde direkt mit der Heiznadel aufgenommen und zwischen die Fadenenden gebracht. Die Klebestelle wurde mit Sonden und einer Heiznadel modelliert. Der Klebstoff ist bei der höchstmöglichen Temperatur der Heiznadel immer noch recht zäh. Das Pulver ist deutlich gröber als das Pulver von Lascaux und daher etwas schwieriger zu dosieren. Es kommt zu einer Farbtonvertiefung an der Klebestelle.

Das Polyamidpulver der Firma Kremer erzielt Verklebungen mit einer durchschnittlichen Zugbeständigkeit von 193 cN. Die Werte schwanken mit 95%iger Wahrscheinlichkeit zwischen 153 und 233 cN mit einer Streuung von 36% vom Mittelwert. Die Werte sind in diesem Bereich gleichmäßig verteilt.

⁴⁴⁶ Laut Angaben auf dem Gerät wird bei der höchstmöglichen Einstellung des Transformators eine Temperatur von 270 °C erreicht, aber durch die dünne Spitze des Heiznadelschuhs ist auch eine Abkühlung denkbar.

⁴⁴⁷ Laut Angaben auf dem Gerät wird bei der höchstmöglichen Einstellung des Transformators eine Temperatur von 270 °C erreicht, aber durch die dünne Spitze des Heiznadelschuhs ist auch eine Abkühlung denkbar.

Die Spannung im Zug-Dehnungs-Diagramm steigt schnell an. Bei Erreichen der Höchstzugkraft entsteht meist ein scharfer Knick nach unten im Kurvenverlauf.

Das Pulver hat also trotz eines höheren Schmelzpunktes eine niedrigere Belastbarkeit als das Pulver der Firma Lascaux (siehe folgender Absatz). Dies widerspricht den Erwartungen, dass das Polyamid mit dem höheren Schmelzpunkt auch die höhere Zugbeständigkeit habe. Ursachen können sein, dass der Schmelzpunkt des Polyamidpulvers der Firma Kremer mit der höchsten Heiznadeleinstellung noch nicht erreicht wurde.⁴⁴⁸ Möglich ist auch, dass das Polyamid der Firma Kremer aufgrund längerer Molekülketten schlechter zwischen die Fasern dringen kann.

Polyamidpulver 5065 (Lascaux)

Die Verarbeitung ähnelt dem des Polyamidpulvers von Kremer. Es ist jedoch feiner und dadurch besser dosierbar. Die Heiznadel kann mit einer niedrigeren Temperatur verwendet werden (90 °C). Auch hier kommt es zu einer Farbtonvertiefung. Insgesamt ist der Zeitaufwand für die Klebungen mit Polyamidpulvern vergleichsweise gering.

Mit dem Polyamidpulver der Firma Lascaux können mit 95%iger Wahrscheinlichkeit Klebungen mit einer Höchstzugbelastbarkeit zwischen 353 und 502 cN erstellt werden. Die Werte sind regelmäßig verteilt. Der Mittelwert liegt bei 428 cN, der Variationskoeffizient bei 31%. Es werden also höhere und weniger schwankende Zugfestigkeiten erreicht als bei dem Polyamidpulver der Firma Kremer.

Im Kurvenverlauf des Zug-Dehnungsdiagramms ist ein langsamerer Anstieg der Spannung zu sehen als bei dem Polyamid von Kremer. Der Klebstoff wird zunächst bei wenig Spannung stark gedehnt, danach steigt die Spannung bei weniger Dehnung stärker an. Die Kurven haben oben ein nach unten abgerundetes Ende (siehe Diagramm 5)

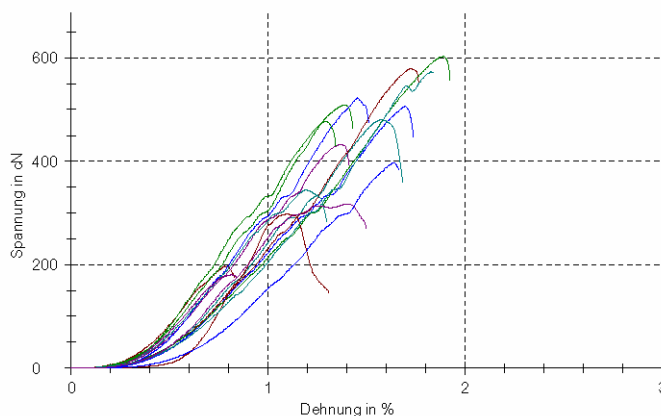


Diagramm 5: Zug-Dehnungs-Diagramm der Klebungen mit Polyamidpulver (Lascaux)

Zusammenfassung der Zugtests an Klebungen mit Schmelzklebstoffen

Unter den fünf getesteten Schmelzklebstoffen zeigt das Polyamidtextilschweißpulver der Firma Lascaux mit Abstand die höchste Zugbelastbarkeit. Es wurde bei etwa 90 °C geschmolzen aufgebracht. Das Textilschweißpulver der Firma Kremer Pigmente mit einer höheren Schmelztemperatur von 130-140 °C und vermutlich auch längeren Molekülketten bei gleichem Aufbau (siehe Kapitel 4.3.8) erzielte dagegen, entgegen den Erwartungen, deutlich geringere Zugbeständigkeiten (weniger als die Hälfte).

Geschmolzenes Paraloid B72 zeigt die nächsthöchste Zugbelastbarkeit. Sie ist vergleichbar mit der Belastbarkeit der Acryldispersionen Plextol D498 und Lascaux 498HV. Im Vergleich dazu ist das weichere Degalan PQ611 weniger belastbar, möglicherweise auch verursacht durch die schwierige Verarbeitbarkeit des zähen geschmolzenen Materials.

⁴⁴⁸ Möglich wäre auch, dass die Hitze zu hoch war, so dass eine thermische Oxidation, also ein Materialabbau, stattfand. Allerdings wäre dies unterhalb des Schmelzpunktes nicht zu erwarten.

Aufgrund der geringen Belastbarkeit und schwierigen Verarbeitung scheint es für die Rissverklebung nicht geeignet zu sein. Die Verklebungen mit BEVA 371 erzielten noch geringere Zugbeständigkeiten.

Wenn ein Schmelzklebstoff für eine Rissverklebung verwendet werden soll, empfiehlt sich demnach das Polyamidschweißpulver der Firma Lascaux.

5.2.3 Modifizierte Störleim-Lösungen und deren Einzelkomponenten

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Zugbelastungstests von Störleim, Weizenstärke, Reisstärke, Aquazol 500, JunFunori und Mischungen dieser Klebstoffe erläutert.

Reisstärkekleister 10%

Reisstärkekleister haftet sehr gut an den Leinenfasern, jedoch haften die mit Reisstärkekleister umhüllten Fasern nur schlecht aneinander. Das Modellieren der Klebung gestaltete sich daher schwierig. Die Verklebungen sind nach dem Trocknen kaum sichtbar.

Die Klebungen mit Reisstärkekleister ergaben geringe Zugbelastbarkeiten von durchschnittlich 143 cN. Die Werte schwanken mit 95%iger Wahrscheinlichkeit zwischen 91 und 195 cN mit Abweichungen bis 51% vom Mittelwert. Sie sind trotz der hohen Abweichungen gleichmäßig gestreut. Die Abweichungen können eventuell durch Inhomogenitäten im Material erklärt werden.⁴⁴⁹ Auch hier erfolgte der Bruch bei der Höchstbelastung ohne weitere Dehnung.

Weizenstärkekleister 10%

Weizenstärkekleister hat bei gleicher Konzentration eine höhere Viskosität als Reisstärkekleister. Dies wurde auch schon von Springob beschrieben.⁴⁵⁰ Der Zusammenhalt der Fasern ist dadurch etwas einfacher zu erreichen. Die optischen Eigenschaften der Klebung sind sehr gut, die Klebestelle ist bis auf eine leichte Verdickung kaum sichtbar.

Auch die Verklebungen mit reinem Weizenstärkekleister ergaben geringe Zugbelastbarkeiten von durchschnittlich 159 cN. Sie liegen etwas höher als bei Reisstärkekleister. Die Werte schwanken zwischen 118 und 200 cN mit einer Varianz von 34%. Der Bruch erfolgt bei der Höchstbelastung, danach erfolgt keine weitere Dehnung.

Aquazol 500, 25%ig

Aquazol 500 ist in 25%iger Konzentration hochviskos und leicht zäh. Das Eindringen in die Fasern ist zunächst sehr schlecht. Der Klebstoff sitzt als Tropfen auf dem Faden - er dringt jedoch beim Zusammendrücken der Fadenenden rasch und gut zwischen die Fasern. Das Modellieren der Klebestelle ist sehr gut möglich. Zunächst tritt nur eine zu vernachlässigende Farbtonvertiefung auf. Wird jedoch eine bestimmte Klebemittelmenge überschritten, kommt es auch bei diesem Klebstoff zu deutlichen Farbtonvertiefungen. Verklebungen mit Aquazol können mit 95%iger Wahrscheinlichkeit Zugbelastungen zwischen 352 und 484 cN aushalten. Die Werte liegen regelmäßig verteilt vor, die Streuung der Werte beträgt 27%. Der Bruch erfolgt bei der Höchstzugbelastung ohne weitere Dehnung.

Störleim-Gel (20%)

Eine erwärmte Störleim-Lösung wurde bei Raumtemperatur etwa zwei Stunden abgekühlt, bis eine hochviskose, gelförmige Lösung entstand. Diese wurde auf die Fäden aufgetragen. Der Klebstoff lässt sich gut verarbeiten. Er dringt jedoch beim Trocknen mit der Heiznadel etwas zu tief in die Fasern ein. Es kommt zu einer deutlichen

⁴⁴⁹ Diese waren mit dem bloßen Auge allerdings nicht zu beobachten.

⁴⁵⁰ SPRINGOB 2001, S. 126.

Farbtonvertiefung an der Klebestelle. Verklebungen mit Störleim gel erreichen mit 95%iger Wahrscheinlichkeit Zugbelastbarkeiten zwischen 631 und 935 cN. Die Werte sind in diesem Bereich regelmäßig verteilt, die Varianz liegt bei 45%, also relativ hoch. Dies lässt auf eine ungleichmäßige Klebung schließen. Der Mittelwert liegt erstaunlich hoch bei 783 cN. Der Kurvenverlauf im Zug-Dehnungsdiagramm steigt linear an. Das heißt, die Spannungszunahme verläuft proportional zur Dehnung. Der Bruch erfolgt bei der Höchstzugbelastung ohne weitere Dehnung. Eine Wiederholung der Testreihe ergab ausgesprochen ähnliche Resultate.

Störleim 20%-Aquazol 500 12,5% (1:1)

Die Mischung von Störleim mit Aquazol muss immer wieder gut gerührt werden, damit eine homogene Mischung bestehen bleibt. Das Eindringverhalten ähnelt dem von reinem Aquazol 500. Die Verarbeitungseigenschaften sind sehr gut, die Fasern lassen sich gut modellieren. Die Farbtonvertiefung ist ähnlich gering wie bei Aquazol 500. Klebungen mit Störleim-Aquazol 12,5%-Mischung erreichen mit 95%iger Wahrscheinlichkeit Zugbelastbarkeiten zwischen 196 und 353 cN. Die Werte sind in diesem Bereich regelmäßig verteilt, der Variationskoeffizient liegt bei 50%, also relativ hoch. Dies lässt auf eine ungleichmäßige Mischung der beiden Komponenten schließen. Der Mittelwert liegt bei 275 cN. Der Bruch erfolgt bei der Höchstzugbelastung ohne weitere Dehnung.

Störleim 20%- Aquazol 500 25% (1:1)

Die Verarbeitung der Mischung und das Eindringverhalten sind mit Störleim-Aquazol 12,5% vergleichbar. Die Mischung ist etwas dickflüssiger. Die Farbtonvertiefung ist ähnlich gering wie bei Aquazol 500. Klebungen mit Störleim-Aquazol 25%-Mischung erreichen mit 95%iger Wahrscheinlichkeit Zugbelastbarkeiten zwischen 276 und 403 cN. Die Werte sind in diesem Bereich regelmäßig verteilt, die Varianz liegt bei 32%. Sie ist damit deutlich niedriger als bei der Störleim-Aquazol 12,5%-Mischung. Dies lässt auf eine gleichmäßigere Mischung der beiden Komponenten schließen. Der Mittelwert liegt bei 340 cN. Er ist damit vergleichsweise niedrig, liegt jedoch höher als bei der anderen Störleim-Aquazol-Mischung. Auffällig ist, dass die Belastbarkeit der Mischungen geringer ist als die der Einzelkomponenten. Der Bruch erfolgt bei der Höchstzugbelastung ohne weitere Dehnung.

Störleim 20%-Tylose MH1000 1% (1:1)

Die Verarbeitbarkeit der Mischung ist sehr gut. Sie dringt jedoch etwas zu tief in die Fasern ein, und es kommt zu einer bleibenden Farbtonvertiefung. Das bedeutet, dass die Verdickung nicht ausreichend ist. Die Klebungen mit Störleim-Tylose-Mischung können mit 95%iger Wahrscheinlichkeit mit Zugkräften zwischen 412 und 600 cN belastet werden. Die Werte sind in diesem Bereich gleichmäßig verteilt, der Mittelwert liegt bei 506 cN, der Variationskoeffizient liegt bei 34%. Nach dem Erreichen der Höchstzugkraft bricht die Klebung und wird nicht weiter gedehnt.

Störleim 20%-JunFunori 1% (1:1)

Die Applikation und Verarbeitung der Störleim-JunFunori-Mischung ist als sehr gut zu bewerten. Die Fasern können gut modelliert werden und bleiben kaum an den Metallwerkzeugen kleben (im Gegensatz zu Störleim-Weizenstärkekleister). Das Eindringverhalten und die optischen Eigenschaften sind sehr gut.

Klebungen mit Störleim-JunFunori halten mit 95%iger Wahrscheinlichkeit Belastungen zwischen 452 und 624 cN aus. Die Werte sind über diesen Bereich recht gleichmäßig verteilt, der Mittelwert liegt bei 538 cN, der Variationskoeffizient beträgt 28%. Nach dem Erreichen der Höchstzugkraft reißt der Klebstoff und es tritt keine weitere Dehnung auf.

Störleim 20%-Reisstärke 10% (1:1)

Mit der Mischung aus Störleim und Reisstärkekleister können die Klebungen ausnehmend gut modelliert werden, da viel Zeit für das Formen bleibt. Das Eindringen des Klebstoffs erscheint optimal, weder zu tief noch zu oberflächlich. Auch die optischen Eigenschaften sind vergleichsweise gut, wenn auch weniger gut als bei der Störleim-Junfunori-Mischung. Bei Klebungen mit Störleim-Reisstärke kann mit 95%iger Wahrscheinlichkeit mit Höchstzugkraftbelastungen zwischen 569 und 855 cN gerechnet werden. Sie sind somit weniger belastbar als Klebungen mit Störleim-Weizenstärke (siehe unten). Die Werte sind in diesem Bereich gleichmäßig verteilt, der Mittelwert liegt bei 712 cN, der Variationskoeffizient ist mit 51% vergleichsweise hoch. Auch bei einer Wiederholung der Testreihe blieb die Tendenz zur breiten Streuung der Ergebnisse unverändert. Dies erscheint vor allem aufgrund der in der Literatur angegebenen besonders guten und homogenen Mischbarkeit der Komponenten schwer zu erklären.

Der Kurvenverlauf zeigt einen beinahe linearen Anstieg der Dehnung proportional zur Spannung. Nach Erreichen der Höchstzugkraft kommt es in vielen Fällen direkt zum Bruch, bei anderen Prüflingen zu einem kurzen, scharfen Abfall der Zugkraft.

Störleim 20% -Weizenstärke 10% (1:1)

Klebungen mit Störleim-Weizenstärke können sehr gut modelliert werden. Das Eindringverhalten ist angemessen. Die optische Erscheinung ist ebenfalls als gut zu bewerten. Es kommt lediglich zu einer leichten Farbtonvertiefung, die lediglich bei Verwendung von zuviel Klebstoff stärker ausfällt. Die Klebungen reißen in den meisten Fällen mit Erreichen der Höchstzugkraft. Es können mit 95%iger Wahrscheinlichkeit Zugbelastungen zwischen 686 und 1022 cN ausgehalten werden, bevor die Klebungen reißen. Die Werte sind in diesem Bereich gleichmäßig verteilt, der Mittelwert liegt bei 854 cN. Es werden also leicht höhere Werte als bei der Addition der einzelnen Komponenten Störleim und Weizenstärkekleister erreicht. Der Variationskoeffizient beträgt 34%.

Die Störleim-Weizenstärkekleister-Verklebungen dehnen sich zunächst bei wenig Spannung. Anschließend steigt die Spannung stärker an und der Kurvenverlauf wird beinahe linear (siehe Diagramm 6).

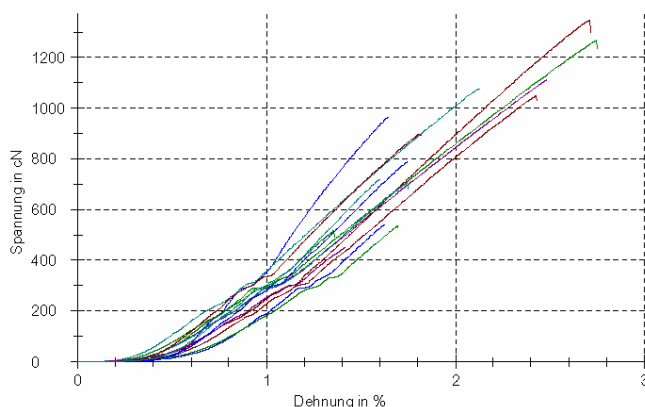


Diagramm 6: Zug-Dehnungs-Diagramm der Klebungen mit Störleim-Weizenstärkekleister

Störleim 20% -Weizenstärke 10% (1:1) ohne Heiznadel

Durch das Weglassen der Trocknung mittels Heiznadel entfällt die Möglichkeit des Nachmodellierens und Verdichtens der Klebung mit der Heiznadel und des sofortigen Fixierens der Fasern in einer bestimmten Position. Die Trockenzeit ist deutlich länger und die Verklebung sollte in dieser Zeit nicht bewegt werden. Die optischen Eigenschaften gleichen den Verklebungen mit der Heiznadel.

Bei Störleim-Weizenstärkeverklebungen ohne Heiznadel können mit 95%iger Wahrscheinlichkeit Klebungen mit einer Höchstzugbelastbarkeit zwischen 823 und 1089 cN erstellt werden. Die Werte sind regelmäßig verteilt. Der Mittelwert liegt bei 956 cN, also höher als bei mit einer Heiznadel getrockneten Verklebung. Der Variationskoeffizient liegt bei 34%. Der Kurvenverlauf des Zug-Dehnungs-Diagramms hat sich im Vergleich zu den bei 45 °C getrockneten Klebungen nichts wesentlich verändert. Eine Ursache für die höhere Zugbelastbarkeit kann sein, dass Störleim bei Temperaturen über 25 °C beim Trocknen nicht seine optimale Struktur aufbauen kann und daher spröde wird. Eine Wiederholung der Testreihe zeigte sehr ähnliche Resultate.

JunFunori 1% und JunFunori 1%-Weizenstärkekleister 10% (1:1)

Eine Verklebung mit reinem JunFunori war nicht möglich, da eine Haftung der Fäden aneinander nicht erreicht werden konnte. Ebenso war eine Klebung mit JunFunori-Weizenstärkekleister nur sehr schwer zu erzielen. Die Mischung war zudem nicht homogen mischbar, es bildeten sich immer wieder Klümpchen. Außerdem war auch hier eine Haftung der Fasern aneinander nur sehr schwer zu erreichen.

Zusammenfassung der Zugtests an Klebungen mit modifizierten Störleimlösungen und deren Einzelkomponenten

Störleim-Mischungen sind besonders gut zu verarbeiten, da eine ausreichend lange Zeit zur Bearbeitung gegeben ist, die Fasern sich durch den Feuchtigkeitsgehalt gut formen lassen und die Anfangshaftung in den meisten Fällen sehr gut ist. Ein weiterer Vorteil ist, dass die Klebung jederzeit durch ein Wiederanlösen mit Wasser korrigiert werden kann.

Die Störleim-Mischungen zeigen insgesamt sehr gute Zugbeständigkeiten. Vor allem die Störleim-Weizenstärkekleister-Mischung erzielte sehr gute Ergebnisse, die sogar über denen der Epoxidharzverklebungen liegen. Die Belastbarkeit der Klebung lässt sich durch das Weglassen der Trocknung mit der Heiznadel weiter verbessern. Dies liegt vermutlich daran, dass Störleim schon bei geringen Temperaturen (laut Haupt über 25 °C)⁴⁵¹ zu schnell trocknet und sich daher nicht in seiner optimalen Lage anordnen kann und spröde wird. Das Kleben ohne Heiznadel bedeutet aber einen höheren Zeitaufwand, da die Klebung länger mit den Sonden in Form gehalten werden muss, bis eine Anfangstrocknung erreicht ist. Eventuell kann eine Trocknung bei 30 statt 45 °C Abhilfe schaffen.

Wenn Störleim ohne Verdickungsmittel als Gel⁴⁵² verwendet wird, so dringt es, ähnlich wie bei einer verdickten Lösung, weniger schnell und tief in die Fasern ein als eine warme Störleimlösung. Es lassen sich dadurch Klebungen erstellen, die sehr gut belastbar sind. Eine Wiederholung der Testreihe ergab ähnliche Werte. Die Verarbeitung ist im Vergleich zu der Störleim-Weizenstärke-Mischung jedoch aufwendiger, da die Klebung praktisch erst beim nochmaligem Anlösen des Leims während des Trockenprozesses mit der Heiznadel erfolgt. Die Verdickung des Störleims mit Reisstärkekleister, JunFunori, Tylose und Aquazol 500 erbrachte im Vergleich dazu geringere Zugbeständigkeiten. Darunter zeigen die Klebungen mit Störleim-Reisstärke-Mischungen die besten Ergebnisse. Eine Ursache für die geringere Belastbarkeit im Vergleich zu Störleim-Weizenstärkekleister kann sein, dass Weizenstärke

⁴⁵¹ HAUPT 2000, S. 97.

⁴⁵² Der Störleim wurde aufgelöst und 2 Stunden bei Raumtemperatur abgekühlt bis ein flüssiger Gelzustand erreicht wurde.

eine höhere Zugbeständigkeit als Reisstärke hat, wie sich in den vorliegenden Versuchen herausgestellt hat. Ein anderer Grund kann die Trennung der Mischung beim Auftrag auf die Leinenfaser sein, wie sie von Springob und Hofmann beobachtet wurde.⁴⁵³ Dabei füllen vermutlich die Weizenstärkepartikel die Hohlräume zwischen den Fasern, während der Störleim ein Stück weiter eindringt. Störleim-Reisstärkekleister bilden dagegen homogenere Mischungen, die sich nicht so schnell trennen.⁴⁵⁴

Bei den Mischungen aus Störleim mit Aquazol ist auffällig, dass die Mischungen eine geringere Klebkraft haben als die beiden Einzelkomponenten. Die Mischung dieser Komponenten ist daher auch für andere Anwendungen nicht zu empfehlen. Die Verdickung mit JunFunori und Tylose setzen die Klebkraft des Störleims herab. Die Klebung mit JunFunori-Störleim-Mischung zeigt jedoch herausragend gute optische Ergebnisse, das heißt eine Verklebung ist farblich nicht erkennbar. Verklebungen mit reinem JunFunori und mit JunFunori-Weizenstärkekleister-Mischungen waren nicht erfolgreich durchführbar. Bei einer Entscheidung für ein wässrig gebundenes Klebemittel empfiehlt sich daher aufgrund der Belastbarkeit die „altbewährte“ Mischung aus Störleim und Weizenstärkekleister,⁴⁵⁵ bestenfalls bei Raumtemperatur und ohne Zuhilfenahme einer Heiznadel getrocknet.

5.2.4 Polyvinylacetat-Dispersionen

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Zugbelastungstests der Klebungen mit PVAC-Dispersionen vorgestellt. Da bei Mowilith D50 die höchste Zugbeständigkeit vorlag, wurden bei diesem Klebemittel zusätzlich zwei Verdünnungen und eine Änderung der Heiznadeltemperatur getestet.

Mowilith DMC2 (95%)

Die Polyvinylacetatdispersion Mowilith DMC2 wurde leicht verdünnt in demineralisiertem Wasser (19:1) verwendet, da in dieser Konzentration ein angemessenes Eindringverhalten in die Fasern festzustellen war. Aufgrund der schnellen Trocknung ist ein rasches Vorgehen bei der Klebung notwendig. Es kommt zu einer Farbtonvertiefung an den Klebestellen.

Bei Verklebungen von Mowilith DMC2 können mit 95%iger Wahrscheinlichkeit Zugbeständigkeiten zwischen 548 und 704 cN erwartet werden. Die Werte liegen vermehrt in den Bereichen um 500 und um 800 cN. Die Kurven mit einer Höchstzugkraft um 500 werden nach dem Erreichen der Höchstzugkraft bei abfallender Spannung weiter gedehnt, während die Klebungen, die über einer Belastung von 700 cN versagen, direkt reißen (siehe Diagramm 7). Der Mittelwert liegt bei 626 cN, der Variationskoeffizient beträgt 22%.

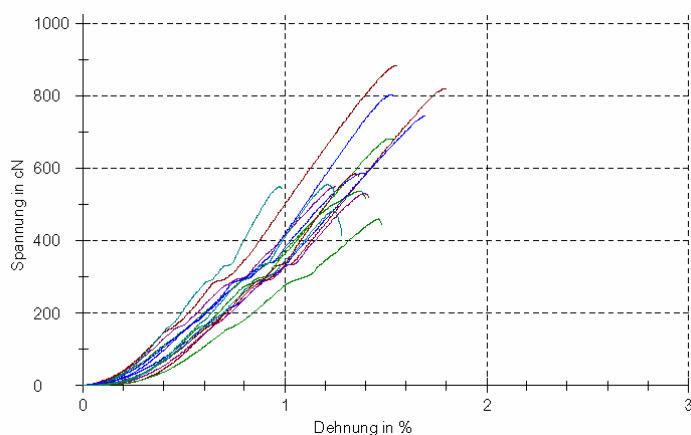


Diagramm 7: Zug-Dehnungs-Diagramm der Klebungen mit Mowilith DMC2

⁴⁵³ SPRINGOB 2001, S. 126; HOFMANN 2003, S. 36.

⁴⁵⁴ Aussagen zur Trennung der Mischungen erfolgen aufgrund der Beobachtungen der Mischungen im Wasserbad.

⁴⁵⁵ Vgl. HEIBER 1996.

Mowilith LD167 (85%)

Mowilith LD167 wurde im Verhältnis 7:1 in demineralisiertem Wasser verdünnt. Das Eindringverhalten war dennoch nicht befriedigend. Eine weitere Verdünnung erschien jedoch nicht angemessen, da die Viskosität dem Augenschein nach dem der anderen Dispersionen entsprach. Die Häutchenbildung und Trocknung verläuft auch bei dieser Dispersion sehr schnell, was ein zügiges Arbeiten verlangt. Auch eine Farbtonvertiefung ist nicht zu vermeiden.

Mit Mowilith LD167 als Klebemittel können mit 95%iger Wahrscheinlichkeit Zugbelastbarkeiten zwischen 544 und 711 cN erreicht werden. Der Mittelwert liegt bei 628 cN, also vergleichbar mit Mowilith DMC2, und deutlich geringer als bei Mowilith DHS S1 und D50 (siehe folgende Absätze). Die Werte sind gleichmäßig verteilt, der Variationskoeffizient liegt bei 30%. Die Zug-Dehnungskurve verläuft beinahe linear. Die meisten Klebungen reißen direkt am Höchstzugkraftpunkt. Die Werte wurden in einer Wiederholung der Versuchsreihe bestätigt.

Mowilith DHS S1 (85%)

Auch diese Dispersion wurde im Verhältnis 7:1 in demineralisiertem Wasser verdünnt, da hier eine geeignete Viskosität festgestellt wurde. Aufgrund der schnellen Trocknung muss der Klebstoff zügig verarbeitet werden. Es kommt zu einer Farbtonvertiefung. Bei Klebungen mit Mowilith DHS S1 kann mit 95%iger Wahrscheinlichkeit mit Höchstzugkraftbelastungen zwischen 561 und 980 cN gerechnet werden. Die Belastbarkeit liegt zwischen der von Störleim-Reisstärke und Störleim-Weizenstärke. Sie liegt auch im Mittelfeld der Polyvinylacetate, unter Mowilith D50 und über Mowilith DMC2 und LD167. Die Werte sind in diesem Bereich gleichmäßig verteilt, der Mittelwert liegt bei 770 cN. Der Variationskoeffizient ist mit 47% vergleichsweise hoch. Alle Kurven enden nach linearem Anstieg mit dem Erreichen der Höchstzugspannung.

Mowilith D50 (95%)

Mowilith D50 wurde im Verhältnis 19:1 in demineralisiertem Wasser verdünnt, um die Viskosität herabzusetzen und die Trocknung zu verzögern. Trotzdem ist ein schnelles Arbeiten notwendig, da die Dispersion sonst antrocknet und dann eine gute Haftung nur noch schwer zu erzielen ist. Die Klebungen sind durch eine Farbtonvertiefung sichtbar.

Klebungen mit Mowilith D50 halten mit 95%iger Wahrscheinlichkeit Belastungen zwischen 824 und 1313 cN aus. Die Werte sind über diesen Bereich recht gleichmäßig verteilt, der Mittelwert liegt bei 1067 cN. In dieser Testreihe ist es somit der Klebstoff, der die höchsten Belastungen aushalten kann. Der Variationskoeffizient beträgt 41%. Er liegt also recht hoch, was bedeutet, dass die Klebungen ungleichmäßig sind.⁴⁵⁶ Nach einem gleichmäßigen proportionalem Anstieg von Dehnung und Spannung versagen die Klebungen am Höchstzugkraftpunkt ohne weitere Dehnung (siehe Diagramm 8).

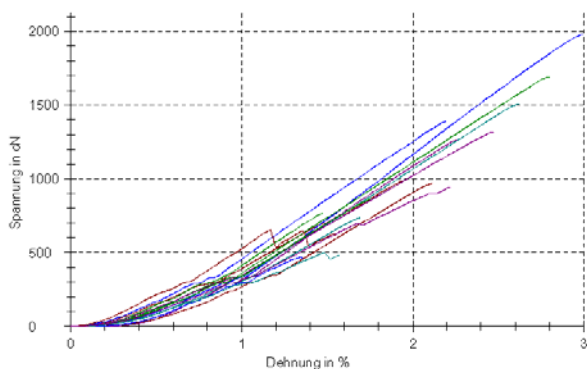


Diagramm 8: Zug-Dehnungs-Diagramm der Klebungen mit Mowilith D50 95%

⁴⁵⁶ Auf eine Wiederholung der Testreihe wurde in diesem Fall verzichtet, da der Klebstoff im personenbezogenen Versuch weiter geprüft wird (siehe Kapitel 5.3).

Mowilith D50 unverdünnt

Unverdünntes Mowilith D50 dringt nur gering in die Fasern ein. Zugleich wird aufgrund der hohen Viskosität häufig zuviel Klebstoff aufgenommen. Die Verarbeitung gestaltet sich zudem schwierig, weil die Trocknung zu schnell abläuft, und der Klebstoff nicht gut zwischen die Fasern dringt. Es kommt zu einer Farbtonvertiefung.

Mit unverdünntem Mowilith D50 können mit 95%iger Wahrscheinlichkeit Klebungen mit einer Höchstzugbelastbarkeit zwischen 1097 und 1500 cN erstellt werden. Die Werte sind regelmäßig verteilt. Der Mittelwert liegt bei 1299 cN, der Variationskoeffizient bei 29%. Es werden also höhere und weniger schwankende Zugfestigkeiten erreicht als bei dem leicht verdünnten Mowilith D50. Dies bedeutet eventuell eine auftretende Entmischung in der Dispersion durch Verdünnung. Der Kurvenverlauf entspricht dem der unverdünnten Klebungen.

Mowilith D50 (90%)

Die Verarbeitung des stärker verdünnten Mowilith D50 gestaltet sich deutlich einfacher. Das Eindringen in die Fasern wird ebenfalls durch das Verdünnen verbessert. Trotz der Verdünnung wird eine Farbtonvertiefung an den Klebestellen sichtbar.

Es werden mit 95%iger Wahrscheinlichkeit Zugfestigkeiten zwischen 755 und 1073 cN erreicht. Die Werte liegen regelmäßig verteilt vor, der Variationskoeffizient ist mit 30% in etwa gleich wie bei unverdünntem Mowilith D50, aber niedriger als bei weniger verdünntem Mowilith D50 (95%).

Im Durchschnitt werden 914 cN als Höchstbelastung erreicht, die Klebungen halten also weniger Zugbelastung aus als unverdünntes oder weniger verdünntes Mowilith D50. Der Kurvenverlauf des Zug-Dehnungs-Diagramms ist vergleichbar mit denen von unverdünntem und weniger verdünntem Klebstoff.

Mowilith D50 (95%) Heiznadeltemperatur 75-80 °C⁴⁵⁷

Durch die Verwendung einer wärmeren Heiznadel (ca. 75-80 °C) wird die Klebung deutlich erleichtert, da das Polyvinylacetat durch die Erwärmung weicher wird und eine Adhäsion über den Druck der Heiznadel erreicht werden kann. Durch die Wärme entsteht eine stärkere Farbtonvertiefung als bei den vorherigen Versuchen mit diesem Klebstoff. So können mit 95%iger Wahrscheinlichkeit Zugbeständigkeiten zwischen 941 und 1460 cN erreicht werden. Der Mittelwert liegt bei 1201 cN. Die Zugbeständigkeit ist somit höher als bei einer niedrigeren Heiznadeleinstellung. Die Streuung ist mit 39% geringer als bei der niedrigeren Heiznadeleinstellung.

Eine Änderung im Kurvenverlauf im Vergleich zu den anderen Klebungen mit Mowilith D50 konnte nicht beobachtet werden.

Zusammenfassung der Zugtests der Klebungen mit Polyvinylacetatdispersionen

Insgesamt haben die Polyvinylacetate, verglichen mit den anderen getesteten Klebstoffen, sehr hohe Zugbeständigkeiten. Dies kann eventuell auch auf die besonders guten Adhäsionseigenschaften zurückgeführt werden. Problematisch bei allen Polyvinylacetaten ist die kurze Zeit, die für das Zusammenfügen und Modellieren der Klebestelle zur Verfügung steht.

Unter den Polyvinylacetaten hat Mowilith DMC2, wie aufgrund des niedrigen Tg zu erwarten, die geringste Zugbeständigkeit. Erstaunlich ist, dass die Verklebungen mit Mowilith LD167 auf etwa den gleichen Wert kommen, obwohl sie einen höheren Tg haben. Die Trocknung verläuft bei diesem Klebstoff besonders schnell und das Klebemittel dringt weniger gut in die Fasern ein. Die Klebungen mit Mowilith DMC2 und LD167 halten weniger Zugspannung aus als Verklebungen mit Störleim-Gel oder Störleim-Weizenstärkekleister-Mischung. Mowilith DHS S1

⁴⁵⁷ Dieser Versuch wurde erst nach der ersten Testreihe und nach der Auswahl für die weiterführenden Versuche gemacht.

hält höhere Zugbelastungen aus. Die höchste Zugbeständigkeit ergibt sich jedoch bei der Verwendung von Mowilith D50. Wird dieses weiter in Wasser verdünnt, sinkt die Zugbeständigkeit. Da die Verarbeitung der unverdünnten Dispersion als schwierig anzusehen ist, wurde für die Folgeversuche Mowilith D50 (95%) ausgewählt. Da die Verwendung von Wärme bei PVAC aber für Rissverklebungen von Heiber nicht empfohlen wird,⁴⁵⁸ wurde auch bei den weiteren Versuchen davon abgesehen. Eine später durchgeführte Testreihe ergab, dass mit Wärme eine noch bessere Adhäsion und vermutlich auch Kohäsion des Klebemittels erreicht werden kann. Dadurch steigt die Zugfestigkeit und die Gleichmäßigkeit der Klebungen nimmt zu. Daher ist die Anwendung von Wärme für die Klebungen mit PVAC zukünftig anzuraten.

5.2.5 Epoxidharz Uhu plus schnellfest

Die Verklebungen mit Epoxidharz gestalteten sich an Einzelfäden als sehr schwierig, da keine Anfangshaftung besteht. Die Fasern müssen ohne Klebstoff in die gewünschte Lage gebracht werden und bis zur Aushärtung des Epoxidharzes in ihrer Position verbleiben. Sie werden dementsprechend vor dem Aufsetzen des Klebstoffs mittels Sonden miteinander verflochten. Das Epoxidharz dringt sehr breit in horizontaler Richtung in die Fasern ein. Die Fäden im Umkreis bis zu 0.5 mm werden dadurch unbeabsichtigt mitgetränkt. Das Eindringverhalten in die Tiefe ist dagegen erstaunlich gering. Ohne mechanische Hilfe dringt Epoxidharz nicht durch den ganzen Fadenquerschnitt.⁴⁵⁹ An den Klebestellen kommt es zu einer deutlichen Farbtonvertiefung. Klebungen mit Epoxidharz erreichen mit 95%iger Wahrscheinlichkeit Zugbelastbarkeiten zwischen 204 und 960 cN. Die Werte sind in diesem Bereich regelmäßig verteilt, der Variationskoeffizient liegt bei 35%. Der Mittelwert liegt bei 797 cN. Der Bruch erfolgt bei der Höchstzugbelastung ohne weitere Dehnung

(siehe Diagramm 9). In vielen Kurven zeigen sich Zwischenspitzen, eventuell aufgrund teilweise auftretendem vorzeitigen Versagens der Klebung.

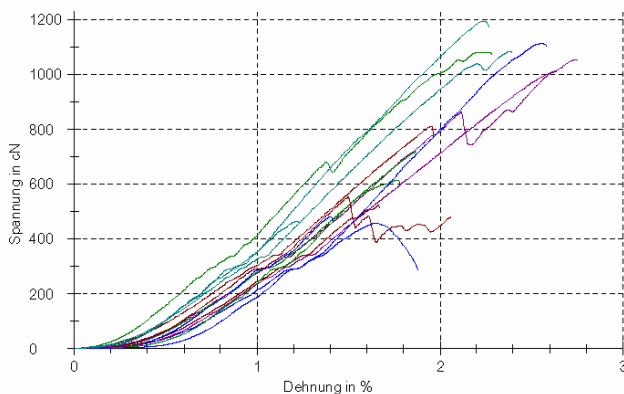


Diagramm 9: Zug-Dehnungs-Diagramm der Klebungen mit Epoxidharz

Die Epoxidharzverklebungen erreichen vergleichsweise niedrige Zugbeständigkeiten. So liegen entgegen den Erwartungen die Verklebungen mit Störleim-Weizenstärke und PVAC deutlich höher, die Epoxidharzklebungen sind eher mit Störleim-Gel-Klebungen vergleichbar. Ursache kann eventuell die schlechte mechanische Verklammerung der Fäden sein, die durch das Epoxidharz anfangs nicht zusammengehalten werden können, weil die Haftung erst beim chemischen Abbindeprozess entsteht. Das Beschweren der einzelnen Fäden mit Gewichten und Silikonpapierzwischenlage erwies sich als nicht praktikabel, da die Fadenenden durch das Gewicht verschoben bzw. zur

⁴⁵⁸ Freundliche mündliche Mitteilung von Prof. Winfried Heiber, Dresden.

⁴⁵⁹ Das geringe Eindringen des Epoxidharzes in die Tiefe könnte auch dem guten Zustand der Fasern geschuldet sein. Zu vermuten ist, dass die Faser Oberfläche keine guten Adhäsionseigenschaften für Epoxidharz hat. Eine Ursache könnte z.B. die vorhandene Pektinschicht der Mittellamelle sein (siehe Kapitel 3). Dies würde auch die insgesamt eher schlechten Zugbeständigkeiten der Epoxidharzklebungen erklären. Bei gealtertem Fasermaterial kann die Oberfläche eine völlig andere Struktur aufweisen und somit eine veränderte und evtl. verbesserte Adhäsion auftreten.

Seite gedrückt wurden. Bei einem Riss in einem Bildträger kann vermutlich mit einer höheren Zugbelastbarkeit gerechnet werden, weil die Fadenenden weniger Möglichkeit haben, verschoben oder zur Seite gedrückt zu werden.

5.2.6 Vergleich mit den Daten von Heiber

Im Vergleich zu den 1996 von Heiber publizierten Daten⁴⁶⁰ zeigt sich eine ähnliche Tendenz. Die niedrigste Belastbarkeit ist bei der Acryldispersion Plextol B500 gegeben, gefolgt von Störleim. Die Verdickung mit Weizenstärke zeigte bei Störleim eine deutliche Steigerung der Klebkraft. Diese wird von Ponal und den nicht mehr hergestellten PVAC-Dispersionen Mowilith DM1 und DM4 übertroffen.

Die von Heiber ermittelten Werte sowie die Unterschiede zwischen den einzelnen Klebmitteln unterscheiden sich von den in dieser Arbeit herausgestellten Ergebnissen. Dies kann auf unterschiedliches Fadenmaterial, Vorgehen und die Belastungsprobe zurückzuführen sein.

⁴⁶⁰ HEIBER 1996, S. 134: Ponal 382 und 394 cN, Mowilith DM1 202 und 194 cN, Mowilith DM4 207 und 195 cN, Plextol B500 97 und 65 cN, Störleim 94 und 116 cN, Störleim-Weizenstärke 239 und 251 cN.

5.3 Zugbelastbarkeit im personenbezogenen Versuch

Für die folgenden Versuche werden aufgrund der hohen Belastbarkeit unter den Störleim-Mischungen Störleim-Weizenstärkekleister, wegen der hohen Zugbeständigkeit und vergleichsweise guten Verarbeitbarkeit unter den PVAC Mowilith D50 (95% in demineralisiertem Wasser) ausgewählt. Angesichts der höchsten Belastbarkeit unter den Schmelzklebstoffen wurde zudem das Polyamidpulver 5065 der Firma Lascaux ausgesucht. Aufgrund der häufigen Empfehlungen in der Literatur wurde auch Epoxidharz mit in die Testreihen aufgenommen. Acrylklebstoffe werden wegen der generell geringen Belastbarkeit in die weiteren Versuche nicht mit einbezogen.

Da die Ergebnisse von Einzelfadenverklebungen erfahrungsgemäß⁴⁶¹ stark von der ausführenden Person abhängen, sollen in diesem Teil der Versuche die Verklebungen von mehreren Testpersonen ausgeführt und die Ergebnisse verglichen werden. Somit wird die Bewertung der durchschnittlichen Belastbarkeit der Verklebungen etwas objektiver. Die Teilnehmer an dem Versuch waren Studenten der Fachhochschule Köln, die kurz vorher an einem einwöchigen Rissverklebungs-Workshop teilgenommen hatten. Die Ergebnisse der einzelnen Testpersonen werden im Folgenden mit Nummern (P1, P2 ...) versehen.

5.3.1 Störleim-Weizenstärkekleister

Bei der Durchführung durch die verschiedenen Testpersonen liegt die Belastbarkeit der Störleim-Weizenstärkekleister-Verklebungen zwischen 340 und 978 cN. Die Schwankungen der Ergebnisse bei den einzelnen Personen betragen 26 bis 95%. Der Mittelwert der Ergebnisse liegt bei 683 cN mit 69% Varianz. Der insgesamt niedrigste Wert lag bei 107 cN, der höchste bei 2227 cN. Dies zeigt, dass bei entsprechender Klebemittelmenge und sorgfältiger Verbindung der Fasern auch Werte über 2000 cN erreicht werden können. Ebenso wird deutlich, dass bei Anwendung von zuwenig Klebstoff und eventueller nachlässiger Verarbeitung auch sehr geringe Belastbarkeitswerte erzielt werden.

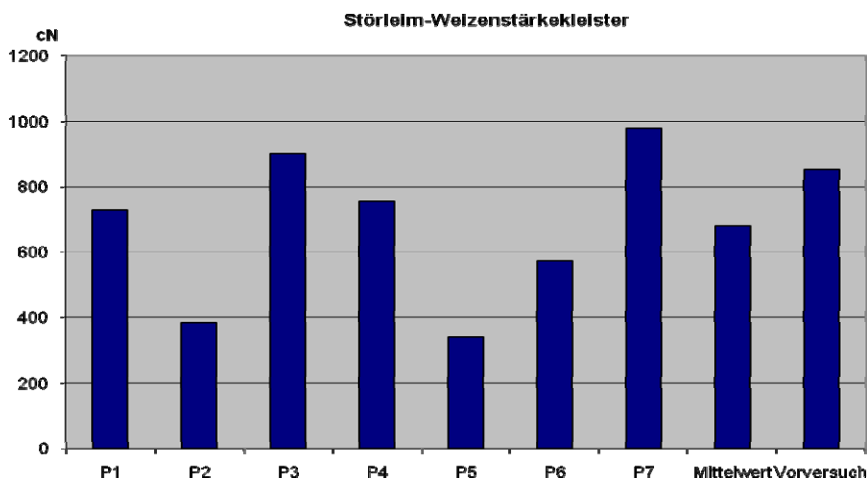


Diagramm 10: Höchstzugkraft der Störleim-Weizenstärkekleister-Klebung im personenbezogenen Versuch

Mit 95%iger Wahrscheinlichkeit können die Verklebungen Zugbelastungen zwischen 562 und 803 cN aushalten.

Die Zugbeständigkeit fällt somit im Durchschnitt im personenbezogenen Versuch deutlich niedriger aus als in den Vorversuchen (siehe Kapitel 5.2). Zwei Testpersonen (P7 und P3) erreichten höhere Ergebnisse, die übrigen erzielten deutlich niedrigere Ergebnisse als in den Vorversuchen erreicht wurden. P7 gibt an, dass sie bei diesem Klebstoff die beste Möglichkeit zur Modellierung der Fasern sah, führte die Verklebungen im Vergleich zu den anderen Personen

⁴⁶¹ Freundliche mündliche Mitteilung von Dipl. Rest. Petra Demuth, FH Köln.

jedoch recht schnell aus. P3 hat für die Verklebungen dagegen sehr viel Zeit und Sorgfalt investiert und erreicht damit ebenfalls eine vergleichsweise hohe Belastbarkeit. Dies zeigt, dass die Art der Modellierung der Klebestelle einen großen Einfluss auf die Verklebung hat. Der Zeitaufwand dabei hängt von der Übung und Geschicklichkeit des Restaurators ab.

Testperson P7 gibt zudem an, dass die Klebestellen dunkler geworden sind und glänzen. Dies spricht dafür, dass mehr Klebstoff verwendet wurde als bei den anderen Testpersonen, die von kaum sichtbaren Klebestellen (P1) oder nur geringen Veränderungen berichten. Dass von P7 die höchsten Belastbarkeiten erreicht wurden, ist daher sicher auch durch die Klebemittelmenge zu begründen.

Insgesamt wird dem Klebstoff ein sehr gutes Modelliervermögen zugesprochen. Als nachteilig werden die langsame Trocknung und das Festkleben an der Lötnadel empfunden. Das Eindringverhalten wird positiv beurteilt. Von beinahe allen Testpersonen (außer P6) wird Störleim-Weizenstärkekleister nach den Klebungen mit allen Klebstoffen als bevorzugter Klebstoff angegeben.

5.3.2 Mowilith D50 (95%)

Die Klebungen mit Mowilith D50 erzielten bei allen Testpersonen relativ hohe Zugbeständigkeiten. Bei P1, P2, P3, P4, P5 und P6 wird die höchste, bei P7 die zweithöchste Belastbarkeit erreicht. Die Zugkräfte, die zu einem Reißen führen, schwanken zwischen 408 (P2) und 1583 (P3) cN. Die Streuung der Werte bei den einzelnen Personen liegt zwischen 23 und 61%. Der Mittelwert aller Proben beträgt 948 cN mit 58% Abweichung. Im Vergleich zu den Vorversuchen wird also im Mittel ein niedrigerer Wert erreicht, es werden jedoch trotzdem durchschnittlich die höchsten Belastbarkeiten erzielt.

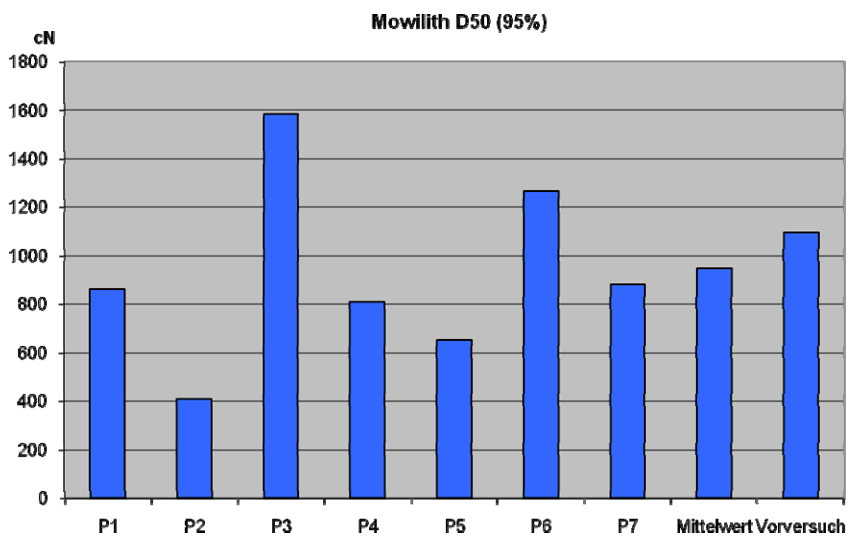


Diagramm 11: Höchstzugkraft der Mowilith D50-Klebungen im personenbezogenen Versuch

Mit 95%iger Wahrscheinlichkeit kann bei Verklebungen mit Mowilith D50 mit Zugbeständigkeiten im Bereich von 810 bis 1087 cN gerechnet werden. Der höchste erreichte Wert liegt bei 2510 cN. Die geringste erzielte Belastbarkeit innerhalb dieser Testreihe lag bei 23 cN. Dies zeigt, dass es bei der Verarbeitung mit diesem Klebstoff Schwierigkeiten geben kann. Alle Personen geben an, dass der Klebstoff etwas zu viskos ist, daher schlecht eindringt und mit mechanischer Hilfe „einmassiert“ werden muss. Durch die schnellere Trocknung im Vergleich zu Störleim-Weizenstärkekleister ist zudem ein schnelles Vorgehen bei der Verklebung nötig. Von einigen Personen wird dies als angenehm und als angemessene Trockenzeit empfunden (P4, P5, P7), andere bemängeln die weniger guten Möglichkeiten zur Modellierung der Fasern und dadurch weniger präzise Verklebung (P1, P3, P6). Gerade die

Verklebungen dieser Personen erreichen aber recht hohe Belastbarkeiten im Zugversuch. Von P7, P5 und P4 werden die Verarbeitungseigenschaften als gut bewertet. Alle Testpersonen bemerkten eine Verdunkelung und Glanzzunahme an den Klebestellen.

Die Klebungen von P3 erreichen herausragend gute Zugbeständigkeiten von durchschnittlich 1583 cN mit einer relativ geringen Abweichung von 33%. Dies liegt vermutlich an der großen Sorgfalt und dem hohen Zeitaufwand, mit dem die Verklebungen durchgeführt wurden. Die Person klagte dabei aber auch über besondere Schwierigkeiten beim Eindringen und die schlechte Modellierbarkeit der Verklebung. Daher kann angenommen werden, dass die Ursache der hohen Belastbarkeiten auch in der Verwendung von besonders viel Klebstoff liegen könnte.

Die geringsten Zugbeständigkeiten sind dagegen bei P2 festzustellen. Sie liegen hier sogar noch unter denen von Störleim-Weizenstärkekleister und Epoxidharz. Als Ursache können die generell niedrigen Ergebnisse dieser Person genannt werden, die vermutlich durch die Verwendung von besonders wenig Klebstoff entstanden. Ein weiterer Grund können die von dieser Person angegebenen Schwierigkeiten bei der Verarbeitung sein (zu schnelles Abbinden, Klebstoff wird bröselig, ungenaue Modellierung).

5.3.3 Polyamid 5065 (Lascaux)

Die Verklebungen mit Polyamidpulver konnten bei den einzelnen Personen im Durchschnitt Zugbelastungen zwischen 143 (P2) und 868 cN (P3) aushalten. Die Schwankungen der einzelnen Personen liegen zwischen 19 und 66%, sind also vergleichsweise gering. Der Mittelwert aller Verklebungen liegt bei 555 cN mit einer Abweichung von 52%. Mit 95%iger Wahrscheinlichkeit liegen die Ergebnisse einer Verklebung mit Polyamid zwischen 483 und 627 cN.

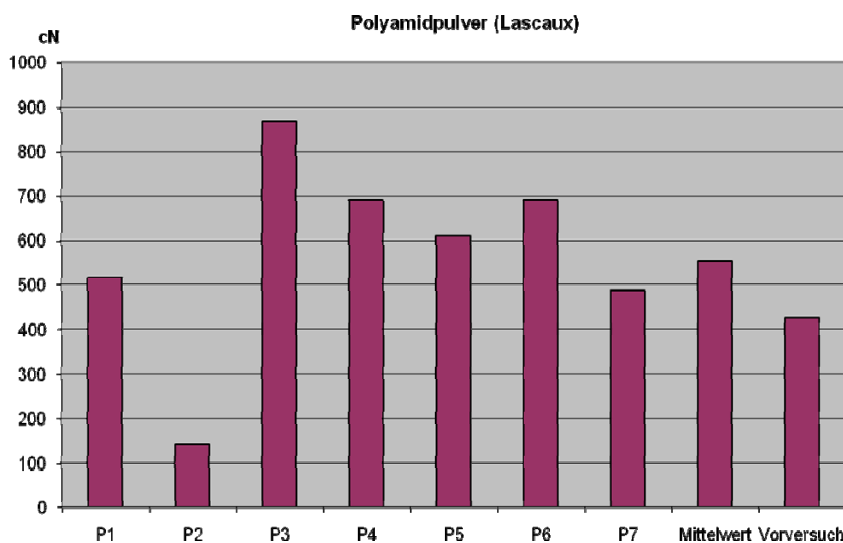


Diagramm 12: Höchstzugkraft der Polyamid-Klebung im personenbezogenen Versuch

Im Durchschnitt können bei Polyamid-Verklebungen die geringsten Belastbarkeiten unter den Klebstoffen dieser Testreihe erreicht werden. Der niedrigste erreichte Wert liegt bei 17, der höchste bei 1080 cN. Dies zeigt, dass bei entsprechender Klebstoffmenge und Verarbeitung sehr hohe Werte erreicht werden können. Bei zu wenig Klebstoff und einer eventuell zu geringen Heiznadeltemperatur in Verbindung mit mangelnder Sorgfalt bei der Modellierung sind jedoch auch nur sehr geringe Belastbarkeiten zu erwarten.

Die Zugbeständigkeit fällt insgesamt deutlich höher aus als in den Vorversuchen (personenbezogener Versuch 555 cN, erster allgemeiner Versuch 428 cN). Einzig P2 erreicht niedrigere Werte als im Vorversuch. Dies kann zum einen durch die längere Zeitspanne zwischen Verklebung und Auswertung bei den Gruppenversuchen erklärt werden, durch die mehr Zeit zur Rekristallisation des Polyamids zur Verfügung stand und es dadurch steifer und belastbarer wurde.

Für die Klebungen mit Polyamidpulver wurde von allen Testpersonen am wenigsten Zeit benötigt. Wertgeschätzt werden die einfache und schnelle Verarbeitung, das präzise Aufbringen und die gute Modellierbarkeit nach einer kurzen Eingewöhnungsphase. Bemängelt werden ein eher schlechtes Eindringen in die Fasern, sowie eine Verdunkelung und Glanzzunahme an der Klebestelle.

Von P3, P5 und P7 wird das Polyamidpulver aufgrund der einfachen und schnellen Verarbeitung als bevorzugter Klebstoff neben Störleim-Weizenstärke genannt, für P6 ist es der alleinige „Lieblingsklebstoff“ für die Rissverklebung.

5.3.4 Epoxidharz

Bei drei Testpersonen (P3, P4, P7) mussten die Epoxidharzverklebungen aus der Wertung genommen werden, weil zuviel Klebstoff verwendet wurde.⁴⁶² Die Belastbarkeit der Epoxidharz-Verklebungen bei den übrigen Testpersonen liegt zwischen 317 (P2) und 924 cN (P6). Die Schwankungen bei den einzelnen Personen betragen 47 bis 91%. Der Mittelwert der Ergebnisse liegt bei 655 cN mit 64% Streuung, wenn P2 nicht mit in die Wertung einbezogen wird (von P2 liegen nur 5 Prüflinge mit stark unterschiedlichen Messungen vor, die deshalb nicht in die Gesamtwertung einfließen.).

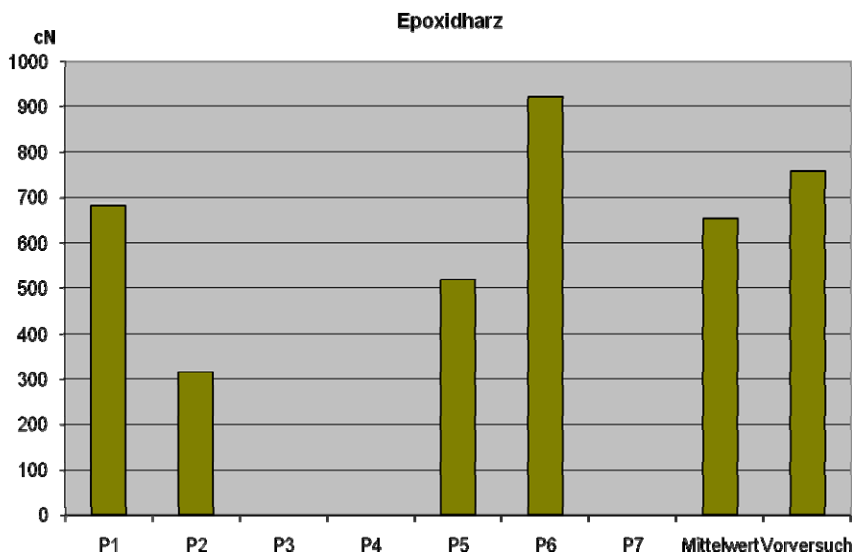


Diagramm 13: Höchstzugkraft der Epoxidharz-Klebungen im personenbezogenen Versuch

Der insgesamt niedrigste Wert lag bei 27, der höchste bei 1508 cN. Dies zeigt, dass bei mangelnder mechanischer Verbindung der Fasern vor dem Auftrag des Klebstoffs, durch die es zu keiner engen Verbindung der Fasern kommt, durchaus auch Werte im Bereich unter 50 cN erreicht werden können. Bei der Verwendung von Epoxidharz kann also nicht davon ausgegangen werden, dass es immer sehr gut klebt, sondern es kommt vor allem hier auf eine sehr sorgfältige Vorbereitung und Verarbeitung an. Bei wenigen Klebungen kam es zu einem Reißen des Fadens vor dem Versagen der Klebung; diese Prüflinge wurden nicht in die Auswertung mit einbezogen. Es kann angenommen werden, dass auch hier zuviel Klebstoff verwendet wurde.

Mit 95%iger Wahrscheinlichkeit können die Verklebungen Zugbelastungen zwischen 445 und 781 cN aushalten. Die Zugbeständigkeit fällt somit im personenbezogenen Versuch etwas niedriger aus als in den Vorversuchen. Sie liegt aber im personenbezogenen Versuch höher als die Beständigkeit von Störleim-Weizenstärkeverklebungen. Eine Testperson (P6) erreicht höhere Ergebnisse, die übrigen (P1, P2 und P5) erzielten niedrigere Ergebnisse als in den Vorversuchen erreicht wurden.

⁴⁶² Der Klebstoff bildete einen dicken Tropfen um die Klebestelle, was in einem Gewebe nicht möglich wäre.

Insgesamt wird dem Klebstoff eine schwierige Verarbeitung zugesprochen. Dies liegt vor allem an der schwierig zu erreichenden engen Haftung der Fasern aneinander und der langen Härungszeit. Als nachteilig werden auch das tiefe Eindringen, das ständige Neu-Anmischen des Klebstoffs und der unangenehme Geruch empfunden. Optisch werden eine Zunahme an Glanz und Tiefenlicht bemängelt.

Bei der Betrachtung der geöffneten Klebungen wird deutlich, dass in vielen Fällen ein Adhäsionsbruch vorliegt. Bei den anderen Klebstoffen kann darüber keine Aussage getroffen werden, da genauere mikroskopische Betrachtungen nötig wären.⁴⁶³

5.3.5 Fazit: Zugbelastung im personenbezogenen Versuch

Insgesamt ist die Varianz der Ergebnisse der einzelnen Personen erstaunlich hoch. So erreicht bei jeder Testperson ein anderer Klebstoff die höchsten Zugbelastbarkeiten. Bei P1, P3 und P6 ist es Mowilith D50, bei P5 ist es Polyamid, bei P7 Störleim-Weizenstärkekleister und bei P4 haben alle Klebstoffe in etwa die gleiche Zugbeständigkeit. Bei P2 werden insgesamt sehr niedrige Werte erreicht.

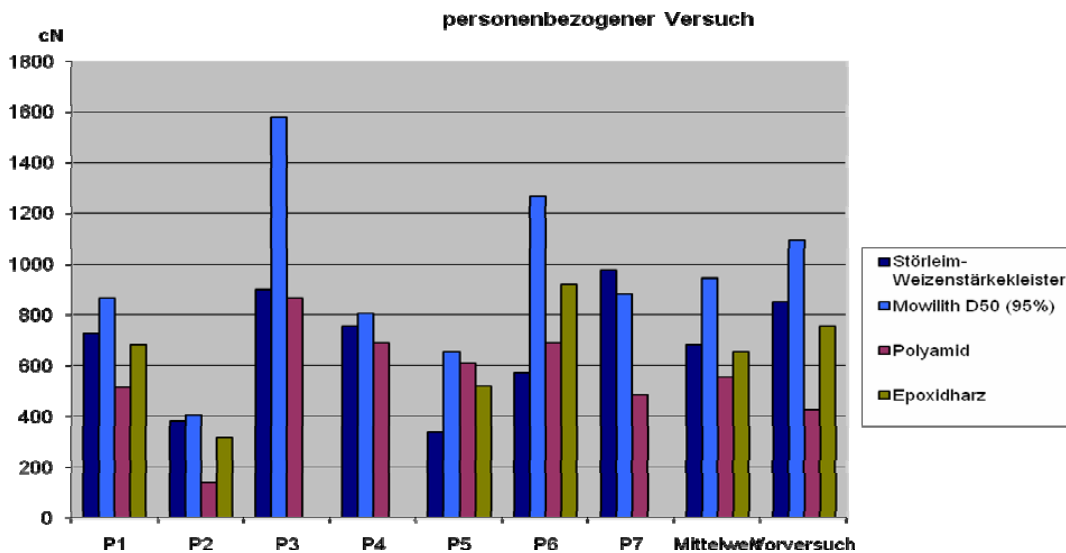


Diagramm 14: Höchstzugkraft im personenbezogenen Versuch

Als Gründe für die Differenzen können die unterschiedliche Übung der Ausführenden, die Dosierung des Klebstoffs, die Art und Sorgfalt bei der Modellierung der Klebestelle, minimale Variationen in der Überlappung und Variationen im Druck sowie in der Heiznadeltemperatur⁴⁶⁴ genannt werden. Eine hohe Qualität der Klebungen erfordert demnach einige Übung und vor allem ständige Sorgfalt und Konzentration. Zumal zu beobachten war, dass die miss-glückten Verklebungen nicht die ersten ungeübten Versuche waren, sondern durchaus mitten im zeitlichen Ablauf der Klebungen auftraten.

Trotz der großen Schwankungen der Ergebnisse sind die Mittelwerte in etwa übereinstimmend mit den Vorversuchen. Insgesamt fallen alle Zugbeständigkeiten etwas geringer aus, was aber auch durch den Einfluss der Klebungen von P2 mit durchweg sehr niedrigen Höchstzugkraftwerten verursacht worden sein kann. Die Belastbarkeit der Verklebungen mit Polyamidpulver war dagegen höher als bei den Vorversuchen. Erklärt werden kann dies vermutlich durch eine längere Wartezeit zwischen Verklebung und Zugbelastung als in den Vorversuchen, in der das Polyamid sich kristallin anordnen konnte.

⁴⁶³ Für diese reichte der Zeitrahmen dieser Arbeit nicht aus. Die gerissenen Fäden werden jedoch an der FH Köln aufbewahrt und können jederzeit auf die Bruchfläche hin untersucht werden.

⁴⁶⁴ Unterschiedliche Temperaturen können entstehen, da Heiznadeln und Transformatoren zwar des gleichen Typs verwendet wurden, diese aber in ihren Einstellungen mit dem Alter durchaus schwanken können.

5.4 Zugbelastbarkeit nach zyklischen Klimawechseln

Die Prüflinge für diese Versuchsreihe wurden 43 Tage (=1032 Stunden) im Klimaschrank mit regelmäßigen 2,5-stündigen Wechseln der relativen Luft-feuchte von 30 auf 85 % gelagert (siehe Abb. 9). Dabei wurden der Minimal- und der Maximalwert über 400-mal erreicht. Als Temperatureinstellung wurde 30 °C gewählt, um unterhalb des Glasübergangspunkts der Materialien zu bleiben, die Reaktionen aber dennoch etwas zu beschleunigen. Anschließend wurden sie bei einem Klima von 55% relativer Feuchte und einer Temperatur von 20 +/- 2 °C der Zugprüfung unterzogen.

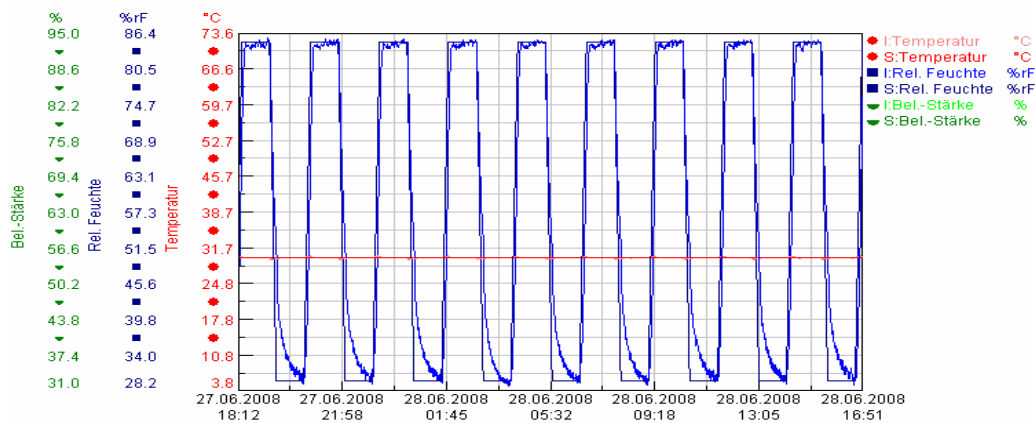


Abb. 9: Ausschnitt des computergestützten Klimaprotokolls der zyklischen Klimawechsel. Der blaue Kurvenverlauf zeigt den Wechsel der Luftfeuchtigkeit von 30 auf 85 % rF (Ist- und Sollwert). Die rote Kurve kennzeichnet den konstanten Temperaturverlauf bei 30 °C.

5.4.1 Störleim-Weizenstärkekleister

Nach der zyklischen Klimabelastung der Störleim-Weizenstärkeverklebungen konnten diese den Zugkräften weniger Widerstand bieten als in den vorherigen Versuchen (siehe Diagramm 15). Die Werte der Höchstzugkraft liegen jedoch in den meisten Fällen (P1, P2, P3, P4, P6) nur knapp unter den Werten vor der Klimabelastung. Bei P7 ist dagegen ein deutlicher Abfall zu erkennen. Einzig bei P5 werden nach den Klimabelastungen höhere Zugbeständigkeiten erzielt. Als Ursache kann die Verwendung von mehr Klebemittel bei diesem Versuchsabschnitt vermutet werden. Ein weiterer Zusammenhang ist die vergleichsweise geringe Zugbeständigkeit der Klebungen von P5 mit Störleim-Weizenstärkekleister im personenbezogenen Versuch ohne Klimabelastung (niedrigster Wert), die deshalb in den Folgeversuchen mit Klimabelastung übertroffen wird (durch Verbesserung der Klebetechnik). Die höheren Werte von P5 nach der Klimabelastung liegen immer noch unter den Werten der meisten anderen Personen (außer P2).

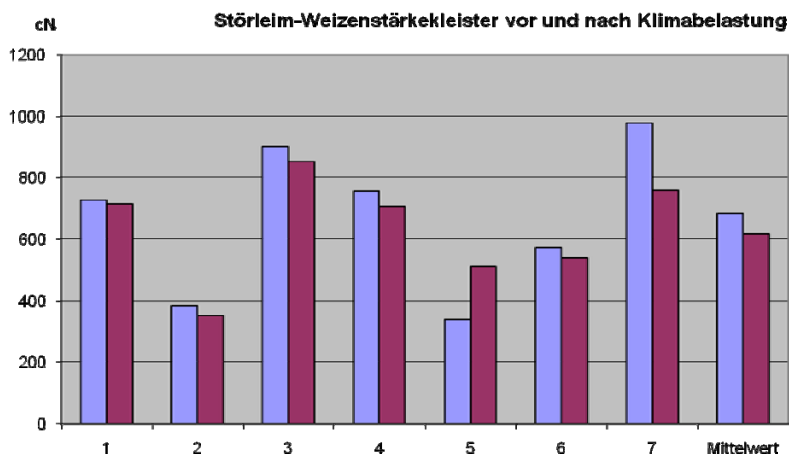


Diagramm 15: Höchstzugkraft der Störleim-Weizenstärkekleister-Klebungen vor und nach der zyklischen Klimabelastung

Im Durchschnitt liegen die Zugbeständigkeiten knapp unterhalb der Beständigkeiten vor der Klimabelastung. Es werden als Mittelwert nur noch 91% der vorherigen Zugbeständigkeit erreicht (619 cN). Zu erklären ist die tendenzielle Abnahme der Zugbeständigkeit durch die Reaktionen von Glutinleimen auf Feuchtigkeitsschwankungen. Sie reagieren mit starken Spannungsänderungen und schrumpfen laut Zumbühl über mehrere Feuchtezyklen kontinuierlich weiter, da in Gelform eine Zunahme an Kristallinität stattfindet. Gleichzeitig nimmt die Relaxationsfähigkeit ab, was eine Versprödung zur Folge hat.⁴⁶⁵ Bei der Verklebung der Leinenfäden kann die Versprödung sowohl eine Abnahme in der Kohäsion als auch in der Adhäsion zu den Fasern verursacht haben.

Der vergleichsweise geringe Umfang der Abnahme (ab 75% rF kommt es laut Zumbühl zu starkem Anstieg des Wassergehalts und das System wird dominant verändert)⁴⁶⁶ kann möglicherweise durch das ähnliche Quell- und Schwindverhalten von Leinenfäden und Glutinleim erklärt werden.

Der Kurvenverlauf des Zug-Dehnungsdiagramms hat sich im Vergleich zum personenbezogenen und zum ersten allgemeinen Versuch nicht verändert.

5.4.2 Mowilith D50 (95%)

Bei Verklebungen mit Mowilith D50 ist nach den Klimabelastungen ebenfalls eine tendenzielle Abnahme der Zugkraft festzustellen. Bei den Klebungen der meisten Personen sind deutlich geringere Zugbeständigkeiten messbar (P1, P3, P6, P7) als beim vorherigen Versuch, während der Unterschied bei P4 nur minimal ist. Bei P2 und P5 sind dagegen signifikant höhere Werte nach den Klimabelastungen zu verzeichnen. Ursachen hierfür können in einer Verbesserung der Klebetechnik, einer größeren Überlappung oder der Verwendung von mehr Klebemitteln in diesem Versuchsabschnitt gesehen werden.

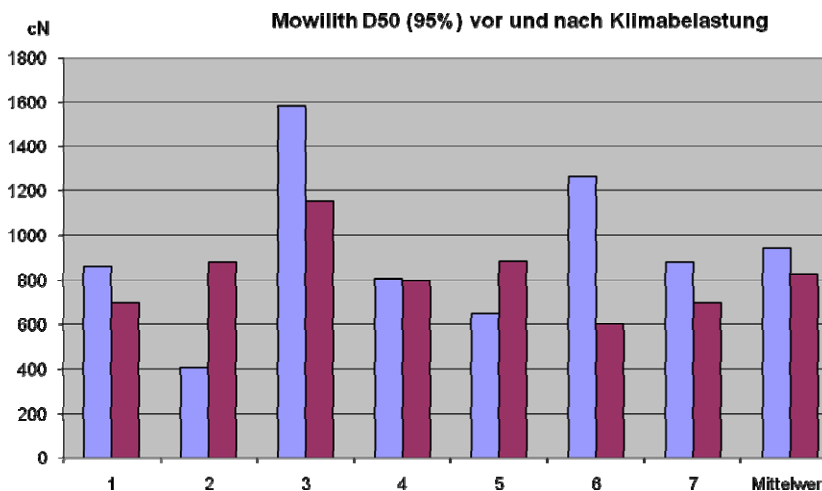


Diagramm 16: Höchstzugkraft der Mowilith D50-Klebungen vor und nach der zyklischen Klimabelastung

Der Mittelwert der Zugversuche nach den Klimabelastungen liegt mit 827 cN bei 87% der Ausgangsbeständigkeit unter dem Mittelwert der Zugversuche vor der Klimabelastung. Ob die Zugbeständigkeit bei längerer Belastung weiter abnehmen würde, ist unklar. Als Ursachen für die abnehmende Belastbarkeit kommt Materialermüdung durch die wechselnde mechanische Belastung durch den unterschiedlichen Zug der quellenden und schwindenden Fäden in Frage. Ein weiterer Grund könnte sein, dass die Polymere durch den Zug gestreckt wurden und die Klebestellen durch den verringerten Durchschnitt weniger belastbar sind. Hierbei kommt vor allem der bekannte sogenannte kalte Fluss der

⁴⁶⁵ ZUMBÜHL 2003, S. 102.

⁴⁶⁶ ZUMBÜHL 2003, S. 100.

Polyvinylacetate in Betracht, obwohl bei einem T_g von 38 °C ein solches Verhalten nicht zu erwarten war. Durch physikalische Alterung kann es zudem zu einer Relaxation und dichteren Anordnung der Molekülketten und damit zu mehr Spannungen und Versprödung gekommen sein.⁴⁶⁷ Auch könnte der anfängliche saure pH-Wert⁴⁶⁸ des Mowilith in Kombination mit regelmäßig auftretenden hohen Feuchtigkeiten eine Degradation an den Fasern hervorgerufen haben, mit denen es in Kontakt war und somit einen Adhäsionsbruch begünstigt haben. Weiterhin könnte durch das Quellen und Schwinden der Fasern die Adhäsion zwischen Klebstoff und Faser nachgelassen haben. Auch das PVAC selbst könnte durch den Einfluss der Emulgatoren und Tenside bei Feuchtigkeit aufgequollen sein und so zu einem Nachlassen der Adhäsion beigetragen haben. Zudem könnten Netzmittel und Tenside, die frei beweglich und nicht an das PVAC gebunden sind, durch das Quellen und Schwinden an die Grenzflächen gewandert sein und können dort die Adhäsion beeinträchtigt haben.

Im Kurvenverlauf des Zug-Dehnungsdiagramms sind keine Änderungen zu erkennen.

5.4.3 Polyamidpulver 5065 (Lascaux)

Nach den zyklischen Feuchtigkeitsschwankungen hat die Zugbelastbarkeit der Klebungen mit Polyamidpulver in den meisten Fällen (P1, P2, P3, P4, P6) zugenommen. Bei P5 und P6 kam es dagegen zu einer Abnahme der Zugbeständigkeit. Der Mittelwert hat sich jedoch mit 750 cN auf 135% der vorherigen Belastbarkeit erhöht. Die Ursache hierfür liegt vermutlich in den zyklischen Zugbelastungen durch die Klimabelastung, die zu einem Strecken der Moleküle und damit zu einer kristallinen Anordnung der Moleküle beigetragen haben können.⁴⁶⁹ Mit der kristallinen Anordnung der Moleküle steigt die Kohäsion von Polyamid.⁴⁷⁰ Wahrscheinlicher ist, dass auch die längere Zeit ausschlaggebend ist, die den Polymeren zur kristallinen Anordnung zur Verfügung stand. So wurde schon eine Zunahme der Zugkraft von den Vorversuchen zu den Gruppenversuchen festgestellt, wobei erstere 3 Wochen und letztere 5 Wochen nach dem Kleben getestet wurden. Die Prüflinge für die Klimabelastung lagerten vor dem Aufspannen 3 Wochen, um dann 6 Wochen im Klimaschrank aufbewahrt zu werden,

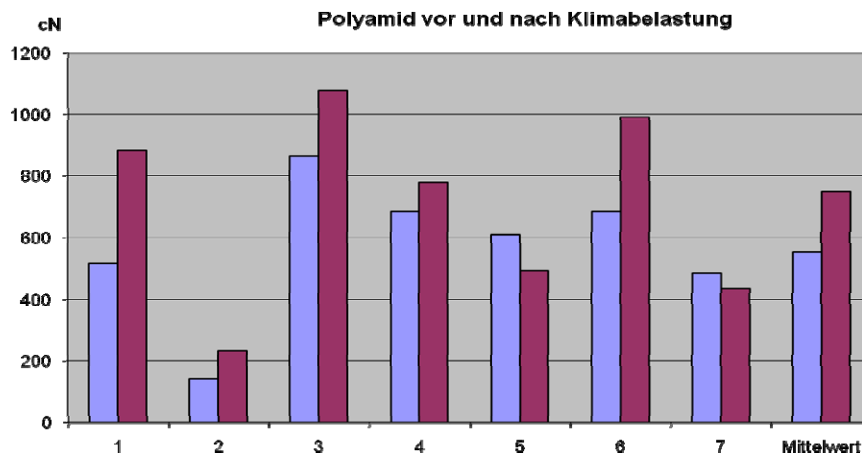


Diagramm 17: Höchstzugkraft der Polyamid-Klebungen vor und nach der zyklischen Klimabelastung

zwischen Klebung und Prüfung liegen also insgesamt 9 Wochen. Leider konnte kein Gegentest mit 9 Wochen alten Prüflingen gemacht werden, die nicht im Klimaschrank aufbewahrt wurden. Die durchschnittliche Zugbeständigkeit

⁴⁶⁷ McGLINCHEY 1993, S. 115f.

⁴⁶⁸ Polyvinylacetat kann bei hoher relativer Feuchte Essigsäure abspalten (siehe Kapitel 4.3.6), ohne weiteres kommt es jedoch nicht zu einer Essigsäureabspaltung (Freundliche mündliche Mitteilung von Prof. Dr. Jägers, FH Köln).

⁴⁶⁹ PA-Fasern haben nach dem Strecken eine höhere Zugbeständigkeit in der Streckrichtung (McGLINCHEY 1993, S. 116).

⁴⁷⁰ Siehe Kapitel 4.3.8.

liegt mit 750 cN zwischen der von Störleim-Reisstärke und Störleim-Weizenstärke in den Vorversuchen. Es ist durchaus möglich, dass die Zugbeständigkeit von Polyamidklebungen mit längerer Lagerungszeit weiter steigt.

Der Kurvenverlauf des Zug-Dehnungs-Diagramms hat sich im Vergleich zu den vorherigen Prüfungen deutlich verändert. Die Dehnung verläuft linearer und bricht in den meisten Fällen mit Erreichen der Höchstzugkraft abrupt ab, während vorher ein eher weiches und rundes Nachgeben aufgezeichnet wurde. Auch dies kann durch eine Zunahme an Kohäsionsfestigkeit erklärt werden.

Durch die Versuche konnte nicht aufgezeigt werden, ob Polyamidverklebungen durch Klimaschwankungen in ihrer Belastbarkeit abnehmen, da eine solche Reaktion, falls sie aufgetreten sein sollte, in jedem Fall durch die anfängliche Zunahme der Kohäsion aufgrund der Zunahme an Kristallinität überdeckt worden ist.

5.4.4 Epoxidharz

Über das Verhalten von Epoxidharz können keine gesicherten Aussagen getroffen werden, da die Klebungen von P3, P4 und P7 aufgrund von zuviel Klebstoff nicht verwendet werden konnten. Die Klebungen von P2 konnten aus Zeitgründen nicht durchgeführt werden. Daher standen nur etwa 30 Prüflinge für den Vergleich zur Verfügung. Davon waren zwei bereits auf den Rahmen im Klimaschrank gerissen. Die Spannung, die durch die Klimaschwankungen entstand, war in diesen Fällen anscheinend schon zu hoch.

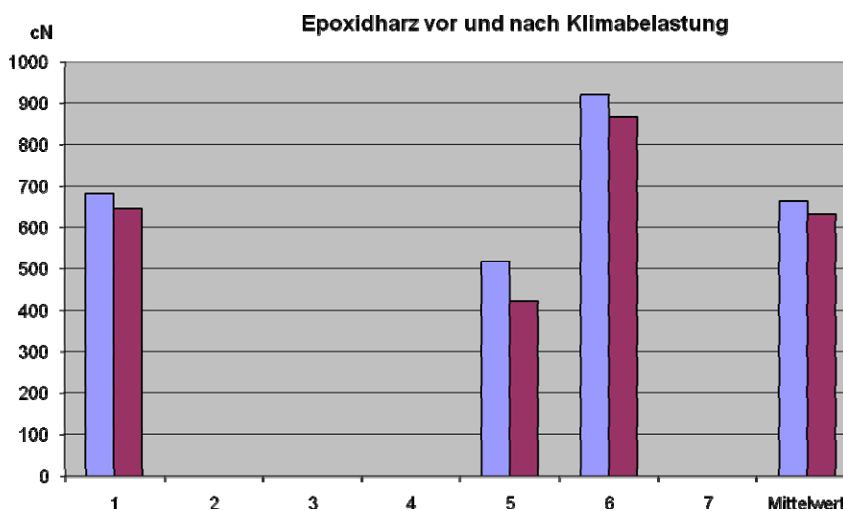


Diagramm 18: Höchstzugkraft der Epoxidharz-Klebungen vor und nach der zyklischen Klimabelastung

Alle Klebestellen waren nach den Klimabelastungen ohne Lichteinfluss deutlich vergilbt. Bei auffällig vielen Epoxidharzklebungen kam es zu deutlich sichtbaren Adhäsionsbrüchen. Die Zugbeständigkeit der Klebungen nimmt generell ab.

Im Vergleich zu den Versuchen ohne Klimabelastung wird mit 635 cN nur noch eine Zugbeständigkeit von 96% erreicht. Damit ist bei Epoxidharz unter den getesteten Klebstoffen mit der geringsten Abnahme in der Zugbeständigkeit zu rechnen.

Gleichzeitig nimmt die Dehnbarkeit der Klebungen ab. Das Zug-Dehnungsdiagramm zeigt einen veränderten Kurvenverlauf (siehe Diagramm 19). Die Klebungen sind zunächst leicht dehnbar (zu sehen am flachen Kurvenverlauf), dann steigt die Kraft für die weitere Dehnung stark an. Die Klebung wird nach dem Erreichen der Höchstzugkraft und vor dem endgültigen Bruch noch etwas weiter gedehnt (zu sehen am kleinen Häkchen am oberen Ende des Kurvenverlaufs).

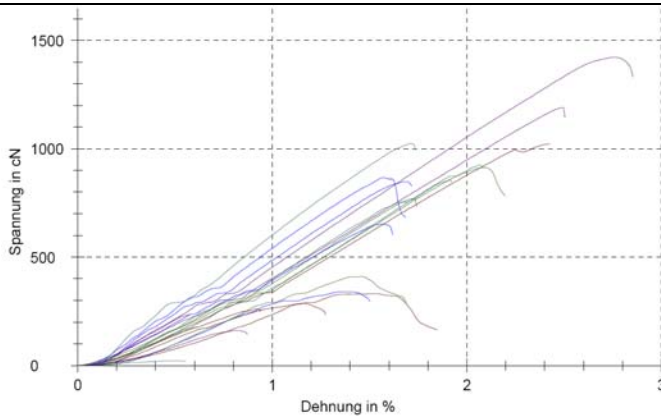


Diagramm 19: Zug-Dehnungs-Diagramm der Klebungen mit Epoxidharz nach der zyklischen Klimabelastung

Ursachen für die Abnahme der Zugfestigkeit können die geringeren Verformungsmöglichkeiten des Epoxidharzes sein, das deshalb die Bewegungen der Fasern nicht mitmacht und die Adhäsion deshalb nachlässt. Eine weitere Ursache kann die Versprödung des Epoxidharzes und damit ungenügende Kohäsion sein. Möglich ist auch eine sehr langsame Wasserdampfdiffusion bei hohen Luftfeuchtigkeiten in das Epoxidharz. Dabei kommt es zu in winzigen Schichten ablaufenden Quellreaktionen. Diese verursachen interne Spannungen an den Grenzflächen zwischen gequollenen und nicht gequollenen Schichten und führen letztendlich zu Mikrobrüchen innerhalb des Materials.⁴⁷¹ Dadurch kommt es zu einem Nachlassen der Kohäsionskräfte. Da die hohen Luftfeuchtigkeiten bei den Klimabelastungen nur kurzzeitig auftreten, sind die Möglichkeiten zur langsamen Wasserdampfdiffusion nicht sehr groß. Dieses Phänomen kann daher nur in den äußersten Grenzflächen aufgetreten sein und wird damit hauptsächlich die Adhäsion beeinträchtigt haben.

5.4.5 Fazit der Zugprüfungen nach zyklischen Klimawechseln

Insgesamt ist bei den Klebstoffen ein Nachlassen der Zugbeständigkeit nach den zyklischen Klimabelastungen zu konstatieren. Die Zugbeständigkeit geht dabei auf 97% (Epoxid), 91% (Störleim-Weizenstärkekleister) beziehungsweise 87% (Mowilith D50) der Anfangsfestigkeit zurück. Allein die Polyamidklebungen nehmen an Zugbeständigkeit zu, da die Zunahme an Kohäsion durch die längere Lagerungszeit eine eventuelle Abnahme durch die zyklische Belastung überdeckt.

Die Klimaversuche liefen über 43 Tage (=1032 Stunden). Dabei waren die Prüflinge bei 30 °C 2,5-stündigen Schwankungen der relativen Feuchte zwischen 30 und 85 % ausgesetzt. In der Praxis werden diese Schwankungen zwar nicht so zeitlich dicht nacheinander erfolgen, es können aber durchaus im Laufe der „Lebensdauer“ einer Rissverklebung insgesamt mehr und eventuell auch stärkere Schwankungen erwartet werden. Zu diesem Zeitpunkt kann noch keine Aussage darüber getroffen werden, ob die Zugbeständigkeiten bei weiteren Klimaschwankungen weiter abnehmen würden und an welchem Punkt das Nachlassen der Klebkraft ein Ende finden würde. Daher sollte für alle Rissverklebungen ein möglichst stabiles klimatisches Umfeld geschaffen werden.

Da es selbst bei Epoxidharz zum Nachlassen der Zugbeständigkeit kam, ist zu überlegen, inwieweit die Bewegungen des Fadenmaterials zu einer Schwächung der Adhäsion beigetragen haben und ob dieses Nachlassen bei der Zugbeständigkeit bei gealtertem Fasermaterial geringer ausfallen würde. Aufgrund des neuen Fasermaterials treten stärkere Quell- und Schwindbewegungen auf als bei gealtertem Fasermaterial. Ebenfalls zu bedenken ist, ob die Bewegungen des Fadens durch die Klimawechsel nicht stärker ausgefallen sein könnten als bei einem mit Bildschicht versteiften Gewebe. Des weiteren sollte bedacht werden, dass sich Fadenmaterial bei Feuchtigkeit ausdehnt, die Spannung also nachlässt, und bei Trockenheit wieder zusammenzieht, während diese Prozesse im Gewebeverbund aufgrund der vorrangigen Dicken-Quellung und dadurch erhöhten Umschlingungswinkel bei Feuchtigkeit genau entgegengesetzt ablaufen.

⁴⁷¹ HORIE 1994, S. 69

5.5 Zugbelastung bei extremen Klimata

Im Rahmen dieser Versuchsreihe soll überprüft werden, wie sich die Zugbeständigkeiten der Klebungen bei besonders feuchtem und besonders trockenem Klima verhalten. Dazu wurden je 15 verklebte Fäden pro Klebstoff und Klima aufgespannt und wechselnden Klimabelastungen ausgesetzt, zusammen mit den Probekörpern zur zyklischen Klimabelastung, siehe Kapitel 5.1.3. Die Ergebnisse der zyklischen Klimabelastung können daher als Referenzwerte für die Zugbeständigkeit bei „normalem“ Museumsklima verwendet werden. Anschließend wurden die aufgespannten Probekörper in ein trockenes oder feuchtes Klima gebracht. Die Raumtemperatur von 20 °C wurde beibehalten. Das feuchte Klima mit 93% relativer Feuchtigkeit wurde über eine gesättigte Kaliumsulfatlösung, das trockene Klima mit 25%iger Feuchtigkeit über getrocknetes Silicagel in dicht schließenden Plexiglasschränken erzeugt. Diesen Klimata waren die Prüflinge jeweils 72 Stunden lang ausgesetzt, bevor sie der Zugprüfung unterzogen wurden.

Das Raumklima für die bei 93% rF konditionierten Prüflinge wurde während der Zugprüfung so feucht wie möglich, auf 75% rF eingestellt, damit die Abgabe von Feuchtigkeit aus dem Prüfling möglichst langsam erfolgt. Beim Prüfen der auf 25% rF konditionierten Prüflinge konnte mittels Luftentfeuchter nur schwer ein trockenes Raumklima erreicht werden. Daher musste die Zugprüfung bei 45 % rF stattfinden.

Vor der Zugprüfung wurden jeweils 5 Prüflinge gleichzeitig aus dem Konditionierungsklima entnommen und so schnell wie möglich nacheinander geprüft. Dazu wurden insgesamt drei Minuten Zeit benötigt. Eine kontinuierliche Veränderung, die auf eine Änderung des Feuchtigkeitsgehalts in so kurzer Zeit schließen lassen könnte, konnte in keinem Fall beobachtet werden. Es muss jedoch damit gerechnet werden, dass die Prüflinge im trockeneren bzw. feuchteren Prüfklima schnell Feuchtigkeit verloren bzw. aufgenommen haben.

Als Ausgangsfestigkeit der Klebungen werden die Werte aus dem ersten allgemeinen Vergleich der Klebstoffe verwendet, da diese von derselben Person ausgeführt wurden. Als weiterer Vergleich werden die bei 55% rF getesteten Klebungen mit derselben zyklischen Klimabelastung heran-gezogen.

5.5.1 Feuchtes Klima 93% rF

Durch die Konditionierung bei 93% relativer Feuchte hatten sich bereits einige Klebungen von selbst gelöst. Jeweils zwei Epoxidharz- und zwei Polyamidklebungen, sowie eine Verklebung mit Mowilith D50 hatten sich geöffnet.

Störleim-Weizenstärke bei 93% rF

Die Zugbeständigkeit der Störleim-Weizenstärkekleister-Klebungen hat sich nach den zyklischen Klimawechseln durch die hohe relative Luftfeuchtigkeit nur geringfügig verändert. Sie erreicht mit 586 cN noch 95% des Werts nach der zyklischen Klimabelastung. Die Belastbarkeit der Mischung zeigt demnach die geringsten Veränderungen bei hoher Luftfeuchtigkeit unter den getesteten Klebstoffen (Störleim-Weizenstärke, Mowilith D50, Epoxidharz, Polyamid). Die Dehnbarkeit der Klebung sowie der Verlauf der Zug-Dehnungs-Kurve änderten sich nicht. Allerdings werden Höchstwerte über 800 cN nicht mehr erreicht.

Bei hoher Feuchtigkeit verringert sich der Tg des Störleims, gleichzeitig kommt es zu einer Quellung des Störleimfilms (siehe Kapitel 4.3.1). Zu erwarten war daher eine deutliche Abnahme der Zugfestigkeit mit gleichzeitig erfolgreicher Zunahme der Dehnbarkeit der Störleim-Klestermischung. Die vorliegenden Ergebnisse bestätigen diese Theorie nicht eindeutig, da nur eine geringe Abnahme der Zugbeständigkeit und keine Veränderung der Dehnbarkeit im Vergleich zu den bei 55% rF getesteten Klebungen stattfand. Möglicherweise waren die Klebungen durch die zyklischen Klimawechsel schon so stark belastet, dass die höchst-mögliche Zunahme an Kristallinität und Abnahme an

Relaxationsfähigkeit schon stattgefunden hat und eine weitere Quellung durch Feuchtigkeit nur noch einen geringen Einfluss auf die Zugbeständigkeit hat. Eventuell könnte auch die Weizenstärkekomponente stabilisierenden Einfluss auf die Reaktion des Störleims bei erhöhter Feuchtigkeit haben.

Mowilith D50 (95%) bei 93% rF

Bei den Klebungen mit Mowilith D50 konnte eine deutliche Abnahme der Zugbeständigkeit durch den Einfluss der hohen Luftfeuchtigkeit festgestellt werden. Sie sank von 827 cN nach den zyklischen Klimabelastungen auf 699 cN. Sie verringerte sich also auf 85%. Im Vergleich zu den Verklebungen ohne Klimabelastung werden sogar nur 73% der Zugfestigkeit erreicht. Ursachen können eine Quellung sowohl des Klebstoffs als auch des Fadenmaterials sein, wie in Kapitel 5.4.2 diskutiert wurde, die einen Adhäsionsverlust zur Folge haben. Auch in der Dispersion enthaltene Tenside können bei hoher relativer Feuchte einen negativen Einfluss auf die Festigkeit der Klebung haben. Durch die Quellung des Klebstoffs kann es gleichzeitig auch zu einem Nachlassen der Kohäsionsfestigkeit gekommen sein. Die Dehnfähigkeit des Materials bleibt jedoch auch bei hoher Luftfeuchtigkeit erhalten. Trotz allem ist bei den Polyvinylacetatklebungen die Abnahme in der Zugbeständigkeit geringer als bei Polyamid und Epoxidharz. Eine Änderung im Kurvenverlauf des Zug-Dehnungsdiagramms konnte nicht festgestellt werden.

Polyamid Lascaux bei 93% rF

Obwohl die Klebungen vor dem Zugversuch eine Woche länger lagerten als die Prüflinge des vorherigen Versuchs, ist die Zugbelastbarkeit sehr gering. Es werden nur noch 35% der Festigkeit der Versuche mit gleich langer zyklischer Klimabelastung und 61% der Ausgangsfestigkeit erreicht. Es kann also davon ausgegangen werden, dass die Wasserdampfaufnahme nicht nur die kristalline Anordnung der Moleküle aufhebt, sondern sie sogar noch weiter schwächt. Im Gegensatz dazu nahm die Belastbarkeit der Polyamidklebungen während der zyklischen Klimabelastung zu. Allerdings wurden dabei nur maximal 85% rF erreicht und diese nur kurzzeitig beibehalten. Im Versuch mit hoher Luftfeuchtigkeit lag die Feuchtigkeit bei 93% und wurde 72 Stunden lang aufrechterhalten. Dies muss zu der außerordentlichen Abnahme an Zugfestigkeit beigetragen haben, indem die eindiffundierenden Wassermoleküle den Kettenzusammenhalt in den kristallinen Bereichen, deren Bildung für die vorherige Zunahme an Belastbarkeit verantwortlich war, gelockert haben. Durch Wassereinlagerung kann sich auch der Glasübergangspunkt von Polyamiden nach unten verschieben. Folgen sind auch eine erhöhte Dehnbarkeit, Volumenzunahme und erhöhte Kettenbeweglichkeit.⁴⁷² Der vorliegende Polyamid Typ 11 hat eine vergleichsweise geringe Wasseraufnahmefähigkeit unter den Polyamiden.⁴⁷³ Sie scheint jedoch ausreichend zu sein, um die Kohäsion deutlich zu verringern. Zusätzlich ist wie bei den anderen Klebstoffen die Lockerung der Adhäsion durch Quellen des Fadens möglich.

Gleichzeitig nimmt auch die Dehnbarkeit rapide ab. Während nach den zyklischen Klimawechseln noch bis zu 3% Dehnung erfolgte, ist bei der hohen Luftfeuchtigkeit die höchste Dehnung bei 1,2% zu verzeichnen. Der Kurvenverlauf des Zug-Dehnungsdiagramms ändert sich dahingehend, dass eine deutlich rundere Spitze zu sehen ist und die Dehnung nach dem ersten Reißen des Klebstoffs weiter fortgesetzt wird. Die Klebung öffnet sich also nicht sprunghaft, sondern gibt langsam nach.

Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass es auch bei länger andauernder 80%iger oder 70%iger rF zu Wassereinlagerung und Abnahme der Kohäsionsfestigkeit des Polyamids kommen kann.

⁴⁷² GRELLMANN, SEIDLER 1998, S. 201.

⁴⁷³ DOMININGHAUS 1972, S. 77.

Epoxidharz bei 93% rF

Die Zugbeständigkeit der Epoxidharzklebungen fällt durch die hohe Feuchtigkeit auf einen erstaunlich niedrigen Wert. Es werden nur noch Zugbeständigkeiten von durchschnittlich 436 cN erreicht. Sie fällt somit auf 72% der Zugbeständigkeit nach den Klimawechseln und auf 58% der Ausgangsfestigkeit. Dies ist umso erstaunlicher, als die Beständigkeit der Klebungen nach den zyklischen Klimawechseln nur geringfügig abgenommen hat. Bei diesen wurden jedoch nur Höchstwerte von 85% rF und diese auch nur kurzzeitig erreicht. Eventuell kommt bei höherer und länger einwirkender relativer Luftfeuchtigkeit eine andere oder deutlich stärkere Reaktion des Epoxidharzes auf Wasserdampf zum tragen. Denkbar wäre eine Art Adhäsionsbruch zwischen hygroskopischem Fasermaterial und dem steifen Klebstoff, der die Quellreaktion der Fasern nicht mitmacht. Dadurch kommt es zu feinen Brüchen im Grenzbereich. Ein weiterer Erklärungsansatz ist die partielle Quellung durch die Penetration von Wasser in das eigentlich starre Epoxidgebilde und die darauf erfolgende Entstehung von Brüchen.⁴⁷⁴

Die Klebungen geben außerdem langsamer und „weicher“ nach und öffnen sich nicht mehr sprunghaft. Diese Tendenz war weniger ausgeprägt auch schon nach den zyklischen Klimawechseln zu beobachten.

Gerade von dem als klimabeständig geltendem Epoxidharz muss daher aufgrund der Tests mit UHU schnellfest bei zu erwartenden temporären hohen Luftfeuchtigkeiten dringend abgeraten werden. Die Tendenz sollte an anderen in der Restaurierung verwendeten Epoxidharzen überprüft werden.

5.5.2 Trockenes Klima mit 25 % rF

Durch die Konditionierung bei 25 % relativer Feuchte lösten sich drei Epoxid-, eine Polyamid- und eine Störleim-Weizenstärkekleister-Klebung. Sie konnten den durch das Zusammenziehen der Leinenfäden bei trockenem Klima entstehenden Spannungen nicht widerstehen.

Auch bei dieser Vorkonditionierung muss damit gerechnet werden, dass im Verlauf der Prüfung und kurz vorher wieder Luftfeuchtigkeit aus dem Raumklima mit 45% rF aufgenommen wurde und sich dadurch der Feuchtigkeitsgehalt der Klebung verändert hat.

Störleim-Weizenstärkekleister bei 25 % rF

Bei trockenem Klima ist der Kurvenverlauf im Vergleich zu den unter anderen Bedingungen geprüften Störleim-Weizenstärkeverklebungen unverändert. Gleichwohl ist eine deutlich erhöhte Zugfestigkeit zu messen. Sie liegt um 200% über der Belastbarkeit der Klebungen, die denselben zyklischen Klimawechseln ausgesetzt waren und dann bei 55 % rF getestet wurden. Die Zugfestigkeit liegt auch 146% höher als die Ausgangsfestigkeit. Somit ist eine deutliche Erhöhung der Zugfestigkeit bei trockenem Klima zu verzeichnen. Als Ursache kann vermutet werden, dass das eingelagerte Wasser, das in Wechselwirkung mit dem Umgebungsklima steht, die polaren sekundären Bindungen innerhalb des Klebstoffs teilweise besetzt. Bei trockenem Klima können somit mehr Bindungen innerhalb des Klebstoffs entstehen. Es kommt daher zu einer Versteifung und Verfestigung. Auch in den Adhäsionsbereichen kann Wasser in der Faser und im Klebstoff sekundäre Bindungsstellen besetzen. Sobald das Klima trockener wird, werden diese Stellen für weitere Bindungen zwischen Klebstoff und Faser möglich. Adhäsion und Kohäsion können so gleichermaßen ansteigen.

⁴⁷⁴ HORIE 1994, S. 69

Mowilith D50 bei 25 % rF

Die Zugbeständigkeit der Mowilith-Verklebungen steigt in trockenem Klima ebenso stark an wie bei Störleim-Weizenstärke. Im Vergleich zur alleinigen zyklischen Klimabelastung werden 200%, im Vergleich zur Ausgangsfestigkeit 154% der Zugfestigkeit erreicht. Die Zunahme der Belastbarkeit ist durch die gleichen Mechanismen wie bei Störleim-Weizenstärkekleister zu erklären. Zusätzlich kann es zu einer Streckung der Moleküle und damit zu einer Verfestigung gekommen sein. Der Kurvenverlauf hat sich im Vergleich zu den Prüflingen nach der zyklischen Klimabelastung nicht verändert.

Polyamid bei 25% rF

Die Klebungen mit Polyamidpulver bilden wieder einmal die Ausnahme. Sie erreichen nur 57% der Zugfestigkeit im Vergleich zu klimabelasteten Klebungen. Immerhin werden 100% der Ausgangsfestigkeit erreicht.

Der Kurvenverlauf im Zug-Dehnungs-Diagramm ist unregelmäßig. Viele Klebungen reißen schon bei einer geringen Spannung. Andere erreichen bis über 800 cN als Höchstzugkraft. Die Abweichungen liegen dementsprechend hoch bei 58%. Die Gründe für die verringerte Belastbarkeit bei trockenem Klima sind bislang ungeklärt.

Epoxid bei 25% rF

Bei den Klebungen mit Epoxidharz konnte eine Erhöhung der Zugfestigkeit in trockenem Klima festgestellt werden. Im Vergleich zu den mit zyklischen Klimawechseln belasteten Klebungen wird eine Beständigkeit von 156%, im Vergleich mit den allgemeinen Versuchen von 124% erreicht. Die Zunahme der Belastbarkeit ist also geringer als bei Störleim-Weizenstärke und Mowilith, aber immer noch beträchtlich.

Der Kurvenverlauf im Zug-Dehnungs-Diagramm ist geradliniger als nach den alleinigen zyklischen Klimabelastungen. Er ähnelt mehr dem linearen Verlauf der Ausgangsversuche.

Auch für diese Versuchsergebnisse ließen sich bislang keine Erklärungen finden

5.5.3 Zusammenfassung der Ergebnisse der Zugprüfung bei Extremklimata

Erstaunlicherweise wurden deutlich andere Ergebnisse als nach den zyklischen Klimawechseln erzielt (siehe Diagramm 20), obwohl das trockene Klima mit 25% rF auch bei diesen erreicht wurde und das feuchte Klima mit 93% nur 8% über dem im Klimaschrank erreichten oberen Feuchtigkeitswerten lag.

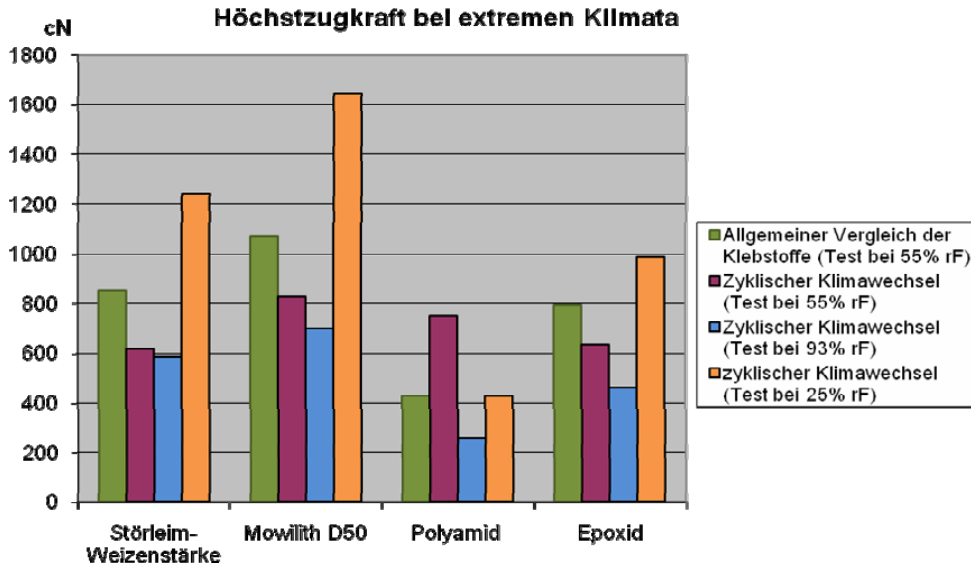


Diagramm 20: Höchstzugkraft der Klebungen bei extremen Klimata

Die Störleim-Weizenstärkeverklebungen verhalten sich insgesamt erstaunlich beständig. Die Zugfestigkeit bei feuchtem Klima verringerte sich nur auf 95% im Vergleich zu den gleich lang zyklisch belasteten Probeverklebungen. In trockenem Klima steigt die Belastbarkeit auf das Doppelte an. Die Ergebnisse zeigen, dass die Störleim-Weizenstärkekleister-Mischung in diesen Versuchen eine deutlich bessere Klimabeständigkeit aufweist als allgemein angenommen wird.

Die Klebungen mit Mowilith D50 zeigen eine stärkere Abnahme der Zugbeständigkeit als die Störleim-Weizenstärkeklebungen. Die Zugfestigkeit verringert sich auf 85%. Bei trockenem Klima wird dagegen auch bei diesem Klebstoff die doppelte Beständigkeit im Vergleich zu den gleich lang zyklisch belasteten Klebungen erreicht.

Die Polyamidklebungen zeigen ein den anderen Klebstoffen gegenläufiges Verhalten. Durch die zyklischen Klimabelastungen allein steigerte sich die

Zugfestigkeit. Die anschließend trockenem und feuchtem Klima ausgesetzten Verklebungen nahmen dagegen beide an Zugfestigkeit ab. Besonders stark ist dies bei den bei 93% rF konditionierten Klebungen zu beobachten. Die Zugfestigkeit sinkt auf 35% der zuvor erreichten Werte. Bei trockenem Klima verringert sich die Zugfestigkeit auf 57% und nähert sich damit wieder dem Wert der ersten allgemeinen Versuche an.

Auch die Epoxidharzklebungen zeigten ein völlig unerwartetes Verhalten. Die Zugfestigkeit nahm durch den Feuchtigkeitseinfluss bei 93% rF deutlich ab. Im Vergleich zu den gleich lang zyklisch belasteten Klebungen werden nur noch 72% der Zugfestigkeit erreicht. In trockenem Klima nimmt die Zugfestigkeit dagegen zu.

Insgesamt ergibt sich aus den Versuchen, dass bei länger andauernden extremen Klimata Polyamidklebungen stark an Festigkeit abnehmen, sowohl bei besonders trockenem als auch bei besonders feuchtem Klima. Bei Mowilith, Epoxidharz und Störleim-Weizenstärke kommt es in trockenem Klima zu einer starken Erhöhung der Zugfestigkeit, die bis zu 200% betragen kann. In feuchtem Klima nimmt die Zugfestigkeit bei allen drei Klebstoffen ab. Die geringste

Abnahme ist mit Abstand bei Störleim-Weizenstärkekleister zu konstatieren. Daraus ergibt sich, dass unter den getesteten Klebstoffen die Störleim-Weizenstärkekleister-Mischung sich am beständigsten in extremen Klimata verhält.

6 Übertragbarkeit der Ergebnisse auf Verklebungen in Leinwandstrukturen

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der Übertragbarkeit der Ergebnisse der einzelnen Fadenverklebungen auf Rissverklebungen an Gemälden. Der dazugehörige Themenbereich ist äußerst komplex und kann hier daher nur in seinen Grundzügen vorgestellt werden. Auch soll zusammenfassend der Frage nachgegangen werden, welche maximalen Spannungen in einem Gemälde zu erwarten sind. Weiterhin ist von Interesse, ob und wie sich die Belastbarkeit einer Klebung in einem Gewebeverbund ändert. Eine kleine Versuchsreihe mit Klebungen an Gewebestreifen soll hierfür weitere Anhaltspunkte liefern.

6.1 Spannungsverhältnisse in textilen Trägern

Entscheidend für die Auswahl eines Klebstoffs für eine Rissverklebung ist, mit welchem Spannungsmaximum bei dem jeweils vorliegenden Gemälde zu rechnen ist. Die bisherigen Forschungen kommen zu keinem einheitlichen Ergebnis.

Spannungen in einem Gemälde mit textilem Bildträger haben vielfältige Ursachen. Die ersten Spannungen treten bereits beim Aufspannen des Trägers oder fertigen Gemäldes auf. Die hierbei aufgewendete Spannung soll die Bildfläche in einer Ebene halten und daher konstant bleiben. Auf jedem einzelnen Faden im Gewebe des textilen Trägers lastet also eine gewisse ständige Spannung. Bei traditionell aufgespannten Gemälden sind die Spannungen oft sehr ungleichmäßig verteilt. Hedley fand durch Versuche mit ungrundierter Leinwand heraus, dass die größte Dehnung unter Zug in den Ecken auftritt.⁴⁷⁵ Auch an den Rändern einer aufgespannten Leinwand wurden unterschiedlich hohe Spannungen gemessen.⁴⁷⁶ Forschungen von Heiber und Young/Hibberd ergaben ebenfalls, dass in den Eckbereichen die höchste Spannungskonzentration auftritt.⁴⁷⁷

Eine weitere Ursache für unterschiedliche Spannungen ist, dass Gemälde aus fest miteinander verbundenen Schichten bestehen, die sehr unterschiedliche mechanische Eigenschaften haben. Grundierung und Malschichten sowie Firnis und Vorleimung können die Reaktionen des Bildträgers mitmachen, verzögern, überlagern oder verstärken.⁴⁷⁸ Auch das Eigengewicht des Gemäldes verursacht, vor allem bei Großformaten oder dicken Bildschichten, eine nach unten zunehmende konstante Zugbelastung im Gemälde.

Bei jedem Klimawechsel ändert sich die Spannung innerhalb des Gemäldegefüges durch Volumenänderungen des textilen Trägers, des Keilrahmens und der Bildschichten. Auch Stöße, Vibrationen und Erschütterungen verursachen kurzfristige Spannungsänderungen.⁴⁷⁹ Es wirken also einerseits langfristige Zugkräfte und andererseits kurzfristige und wechselnde Spannungen auf ein Gemälde - und damit auch auf die Rissverklebung.

Bei einer zeitweiligen Spannungserhöhung kehrt eine Leinwand nach kurzer Zeit auf einen für jede Leinwand und jedes Klima spezifischen Spannungswert zurück. Dabei werden übermäßige Spannungen durch Relaxationsprozesse abgebaut. Dieser Spannungs-Gleichgewichtszustand wird maximal haltbare Spannung (maximum sustainable tension, MST) genannt.⁴⁸⁰

⁴⁷⁵ HEDLEY 1975, S. 4.

⁴⁷⁶ HEDLEY 1975, S. 7.

⁴⁷⁷ HEIBER 1996, S. 39.

⁴⁷⁸ MAGER 2007 S. 44.

⁴⁷⁹ MECKLENBURG, TUMOSA 1991, S. 137.

⁴⁸⁰ BERGER, RUSSELL 1989, S. 198.

Zur Messung von Spannungsänderungen in aufgespannten Geweben gibt es zwei unterschiedliche Versuchsaufbauten. Wegen des einfacheren Versuchsaufbaus wird in vielen Versuchen nur in einer Richtung Zug angelegt. Bei Belastung in zwei Richtungen überlagern sich die zwei Spannungsrichtungen und ergeben eine höhere Belastbarkeit des Gewebes.⁴⁸¹ Dieser Aufbau ist den in Gemälden üblicherweise auftretenden Spannungen ähnlicher.

In der Restaurierungsliteratur ist es üblich, die Zugspannung von Gemälden mit Newton pro Meter (N/m, 1N entspricht in etwa 0,1 kg oder 100g) anzugeben. Die Dicke der Leinwand mit den aufliegenden Schichten bleibt dabei unbeachtet. Die folgende Tabelle soll eine Übersicht über einige wichtige Forschungsergebnisse zu den Spannungsverhältnissen und –änderungen bieten.

Autor, Jahr	Prüfkörper	Spannungsermittlung	Ergebnis	
BERGER, RUSSELL 1984	Leinengewebe (keine weiteren Angaben) stark geleimt mit Hautleim	selbstgebautes biaxiales Messsystem	Maximale Spannung, die im Versuch erreicht wurde: 500 N/m	
BERGER, RUSSELL 1988	Mittelgrobes, ungeleimtes und ungrundiertes Leinengewebe (keine näheren Angaben)	eigenes biaxiales Messsystem („The Berger/Russell biaxial stress tester for stretched canvas“)	60-130 N/m = maximale konstante Spannung (MST) für eine mittelgrobe Leinwand.	Der Wert gilt für unbeschichtetes Leinen. Bei Gemälden, die durch die Malschicht steifer sind, fällt der Wert eventuell höher aus.
HEDLEY 1988	Verschiedene Proben bei Raumklima	uniaxiale Zugprüfmaschine (Fa. Instron), wechselnde Klimabedingungen	300-800g / 2,5 cm ist eine normale stabile Spannung (entspricht 120-320 N/m)	Dieser Wert wurde als Startpunkt der weiteren Messungen (s. unten) festgelegt.
HEDLEY 1988	Leinengewebe, vorgeleimt, Bleiweiß-Kreide-Grundierung, etwa 300g/m ² , 14,2x14,6 Fäden/cm ² , Hinterspannung eines Gemäldes von 1862, Probengröße 2,5 x 15cm	uniaxiale Zugprüfmaschine (Fa. Instron), wechselnde Klimabedingungen	Höchste gemessene Spannung: 1,5 kg/2,5cm bei 30% rF (entspricht 600 N/m)	
HEDLEY 1988	Leinengewebe, vorgeleimt, Bleiweiß-Kreide-Grundierung, etwa 300g/m ² , 14,6x15 Fäden/cm ² , Hinterspannung eines Gemäldes von 1856, Probengröße 2,5 x 15cm	uniaxiale Zugprüfmaschine (Fa. Instron), wechselnde Klimabedingungen	Höchste gemessene Spannung: 1,3 kg/2,5cm bei 20% rF (entspricht 520 N/m)	
HEDLEY 1988	Leinengewebe, vorgeleimt, Bleiweiß-Kreide-Grundierung, etwa 300g/m ² , 14,2x15 Fäden/cm ² , Hinterspannung eines Gemäldes von 1866-68, Probengröße 2,5 x 15cm	uniaxiale Zugprüfmaschine (Fa. Instron), wechselnde Klimabedingungen	Höchste gemessene Spannung: 1,2 kg/2,5cm bei 10% rF (entspricht 480 N/m)	
HEDLEY 1988	Ehemals doubliertes Ölgemälde mit dickem Firnis von 1920-35, Leinengewebe Twill-Webung (2:1), 15,7x17,7 Fäden/cm ² , Probengröße 2,5 x 15cm	uniaxiale Zugprüfmaschine (Fa. Instron), wechselnde Klimabedingungen	Höchste gemessene Spannung: 1,9 kg/2,5cm bei 20% rF (entspricht 760 N/m)	
HEDLEY 1988	Ölgemälde von 1912, Probengröße 1,25 x 15cm	uniaxiale Zugprüfmaschine (Fa. Instron), wechselnde Klimabedingungen	Höchste gemessene Spannung: 1,2 kg/2,5cm bei 20% rF (entspricht 480 N/m)	
BERGER, RUSSELL 1989	Leinengewebe 25x 25 cm + 1 cm Rand zum Aufspannen, 225g/m ² , 12x12 Fäden/cm ² , synthetische Vorleimung, Ölgrundierung	eigenes biaxiales Messsystem („The Berger/Russell biaxial stress tester for stretched canvas“)	Es wurde eine zum Feuchtigkeitsgehalt antiproportionale Spannungsänderung festgestellt: bei 10% rF bestand eine Spannung von 450 N/m , bei 100% rF von 120 N/m	Bei normalem Klima Schwankungen um 200% in der Spannung

⁴⁸¹ TOST 2005, S. 12; YOUNG, HIBBERD 1999, S. 137.

BERGER, RUSSELL 1989	Leinengewebe 25x 25 cm + 1 cm Rand zum Aufspannen, 200 g/m ² , 15x18 Fäden/cm ² , Acrylleimung, Acrylgrundierung	eigenes biaxiales Messsystem („The Berger/Russell biaxial stress tester for stretched canvas“)	Bei 100% rF werden Höchstspannungen von über 950 N/m erreicht, bei 10% rF sind es nur 60 N/m .	
BERGER, RUSSELL 1989	Leinengewebe allgemein	eigenes biaxiales Messsystem („The Berger/Russell biaxial stress tester for stretched canvas“)	200 N/m Spannung ist zu stark (es tritt plastische Verformung auf) 100N/m ist eine „normale“ Spannung.	Bei Klimaschwankungen wurden wiederholt Spannungsänderungen von mehr als 1500% registriert. Die Autoren schließen nicht aus, dass bei sehr starken Leinwänden dieser Wert auch konstant überschritten werden kann.
BERGER, RUSSELL 1989	Panoramagemälde 1,5 m hoch, Ölfarbe		Am oberen Rand besteht konstant eine Spannung von 200-400 N/m	
YOUNG, HIBBERD 1999	Superfine plain weave Belgian Linen (Russell & Chappell L184, 230g/m ²) 25 x25 cm	selbstgebautes biaxiales Messsystem der Tate Gallery, London	4000 N/m ist zu stark gespannt. Höchstmögliche Beanspruchung ist 2000 N/m² ; für 25x25cm bedeutet dies 500 N/m in jeder Richtung	Im gleichen Artikel schreiben die Autoren, dass 30-60 N/m in jeder Richtung gleichwertig mit der Spannung eines neu aufgespannten oder doublierten Gemäldes sei.
BERGER, RUSSELL 2000, S. 277ff	Verschiedene Gewebe, Zusammenfassung von 18 Jahren Forschung	biaxiales Messsystem („The Berger/Russell biaxial stress tester for stretched canvas“)	lange haltbar ist nur eine Spannung von oder unter 100 N/m (MST)	Bei stärkeren Geweben können auch 200-300 N/m als Dauerspannung auftreten
BERGER, RUSSELL 2000, S. 277ff	Leinengewebe, vorgeleimt und grundiert mit Acrylhaltigem Bindemittel, 210g/m ² , 15x18 Fäden/cm ²	biaxiales Messsystem („The Berger/Russell biaxial stress tester for stretched canvas“)	Zwischen 10 und 100% rF treten Spannungen von 90 –750 N/m auf.	Es können Schwankungen bis 1500% auftreten.
BERGER, RUSSELL 1988	Rohes, schweres Leinengewebe 11,2 Doppelfäden/cm in Schuss-, 10 Doppelfäden in Kettrichtung pro cm, 350g/m ²	biaxiales Messsystem („The Berger/Russell biaxial stress tester for stretched canvas“)	Dauerhafter Zug ohne Schädigung: 170 N/m , bei Anstieg der Luftfeuchte Spannungsmaximum bei 230 N/m	
BERGER, RUSSELL 1988	Leichtes Leinengewebe (16,6 F/cm, 200g/m ²), ungeleimt, ungrundiert	biaxiales Messsystem („The Berger/Russell biaxial stress tester for stretched canvas“)	Maximalwert bei hoher Luftfeuchte: 280 N/m	
BERGER, RUSSELL 1988	Vorgeleimtes Leinengewebe	biaxiales Messsystem („The Berger/Russell biaxial stress tester for stretched canvas“)	Langsames Trocknen und Befeuchten: Maximalwerte von 260 N/m ; Sprunghaftes Trocknen von 75 auf 40%: 380 N/m	Reagiert umgekehrt oder gedämpft auf Klimaschwankungen, frisch grundiertes Gewebe reagiert sehr ähnlich
BERGER, RUSSELL 1988	100 Jahre altes, vorgeleimtes und ölgrundiertes Leinengewebe	biaxiales Messsystem („The Berger/Russell biaxial stress tester for stretched canvas“)	Schnelle Klimawechsel: bis 200N/m	
BERGER, RUSSELL 1988	Ölgemälde von 1974	biaxiales Messsystem („Berger/Russell bi-axial stress tester for stretched canvas“)	Spannungen bis 340 N/m	
TOST 2005	Unbehandeltes, ungealtertes Leinengewebe (2,5 cm+ 5mm ausgefrante Seiten, Einspannlänge 10 cm) 14,3 x 13,4 Fäden/cm ² , 308,6 g/m ² , Schlichte vorhanden, Hersteller: Kremer Pigmente	Uniaxiale Zugprüfung, Zwick-Zugprüfmaschine, Firma Roell; obere Kraftgrenze 8N, Prüfgeschwindigkeit 20 mm/min, Ausgangs-länge: > 100mm	Höchstzugkraft 823 N (3292 N/m)	Höchstzugkraft, die kurz vor dem Reißen des Gewebes erreicht wird.
TOST 2005	künstlich gealtertes Leinengewebe (2,5 cm+ 5mm ausgefrante Seiten, Einspannlänge 10 cm) 14,3 x 13,4 Fäden/cm ² , 308,6 g/m ² , Schlichte vorhanden, Hersteller: Kremer	Uniaxiale Zugprüfung, Zwick-Zugprüfmaschine, Fa. Roell; obere Kraft-grenze 8N, Prüfe -schwindigkeit 20 mm/min, Ausgangs-länge: > 100mm	Höchstzugkraft 655 N (2620 N/m)	Höchstzugkraft, die kurz vor dem Reißen des Gewebes erreicht wird.

Tabelle 7: Bisherige Forschungsergebnisse zu (Höchst-) Spannungen in Leinwandgemälden

Die oben aufgeführten Forschungsergebnisse zeigen, dass durchaus sehr inkongruente Resultate erzielt wurden. Dies liegt unter anderem an abweichenden Versuchsaufbauten, vor allem aber an der Unterschiedlichkeit der getesteten Gewebe. Sie ergeben sich aus der Garnherstellung, Faserart, Faserlänge, Fadendurchmesser, Fadendrehung, Webart, Fadendichte, Umschlingungswinkel, Leinwandbehandlung vor oder nach dem Weben, Größe des Probestücks und schließlich dem Degradationsgrad des textilen Trägers. In der Praxis kommen in jedem Fall die Bildschicht aus mehreren unterschiedlichen Schichten, sowie gegebenenfalls die Vorleimung hinzu. Diese Fülle an Einflussfaktoren und Kombinationsmöglichkeiten erschwert eine allgemeine Vorhersage der zu erwartenden Spannungsmaxima in einem Gemälde beträchtlich. Die Spannungen, denen eine Rissverklebung ausgesetzt sein wird, sind also vielfältig und in ihrer Höhe nicht theoretisch vorhersehbar. Es kann jedoch in etwa eine Einschätzung vorgenommen werden. Die genannten Spannungswerte für grundierte oder bemalte textile Träger liegen zwischen 60 und 950 N/m. Man könnte daher annehmen, dass ein großes Gemälde mit dicker Malschicht und grober Leinwand bei feuchtem Klima Spannungen von 950 N/m erreicht. Dies entspräche bei 10 Fäden/cm einer Belastung 95 cN pro Faden. Dagegen weist ein kleines, locker aufgespanntes Gemälde in trockenem Klima vermutlich eher Spannungen um 60 N/m auf. Das entspräche etwa 6 cN/Faden bei 10 Fäden/cm. Diese Werte werden von den in dieser Arbeit gemessenen

Resultaten bei weitem überschritten. Selbst die schwächsten Klebemittel wie z.B. Plextol D360 oder Beva 371 würden diesen Anforderungen genügen.

Es ist jedoch zu bedenken, dass die Fäden in Geweben schlechter zu erreichen sind als die in dieser Arbeit verwendeten einzelnen Fäden. Daher ist mit niedrigeren Ergebnissen bei Rissverklebungen in Geweben zu rechnen. Zudem hält eine Klebung nur so gut wie ihr schwächstes Glied, wie im folgenden Versuch nachgewiesen wird. Daher muss nicht der Mittelwert, sondern der niedrigste erreichte Wert eines Klebemittels einberechnet werden. Ein weiterer wichtiger Punkt ist, dass bei Versuchen von Berger und Russell bei „normalen Klimaveränderungen“ Spannungsschwankungen von mehr als 1500% auftraten.⁴⁸²

Nehmen wir z.B. an, dass in einem Gemälde normalerweise eine Spannung von 500 N/m vorherrscht, also bei 10x10 Fäden/cm² die Verklebung pro Faden 50 cN aushalten muss. Sicherheitshalber sollte auf diesen Wert 10% aufgeschlagen werden, da die Fäden im Gewebe schlechter zu erreichen sind (also 55 cN/Faden). Da dieser Wert um 1500% schwanken kann, kämen Höchstlasten von 825 cN pro Faden auf. Dieser Wert wird nur von wenigen getesteten Klebemitteln mit ihrem Durchschnittswert erreicht (Störleim-Weizenstärkekleister und Mowilith D50). Wenn der niedrigste erreichte Wert der Testreihen in Rechnung gestellt wird, genügt keines der getesteten Klebemittel der Anforderung. Allerdings handelt es sich bei Schwankungen um 1500% um Extrembelastungen, die in den seltensten Fällen auftreten, etwa bei Wasserschäden oder starken Stoßbelastungen. In diesen Fällen wäre eine erneute Öffnung der Rissverklebung zu vertreten.

Ein weiterer wichtiger Punkt ist die voraussichtlich weniger hohe Zugbeständigkeit der getesteten Klebemittel unter langzeitigen Zugbelastungen, wie sie an Gemälden normalerweise vorherrschen. Auch ein Nachlassen der Belastbarkeit der Klebstoffe durch ihre Alterung sollte nicht außer Acht gelassen werden.

Für die Anforderungen an die Festigkeit einer einzelnen Fadenverklebung bedeutet dies, dass wegen der schwer vorauszusehenden Höchstlast immer eine möglichst hohe Zugbeständigkeit angestrebt werden sollte.

6.2 Versuchsaufbau

In diesem Versuch soll geklärt werden, ob die in Kapitel 5 gewonnenen Erkenntnisse zur Zugbeständigkeit der Klebemittel an Einzelfadenverklebungen auch auf Risse und Schnitte in Geweben übertragbar sind. Zur Überprüfung

⁴⁸² BERGER, RUSSELL 1989, S. 198.

erfolgte eine Verklebung an Schnitten in Geweben. Dazu wurde das Gewebe „Leinwand 165“ der Firma Kremer-Pigmente verwendet. Es wurde aufgrund des vergleichbaren Fadendurchmessers mit den Prüflingen der Einzelfadenverklebungen ausgewählt. Das Leinengewebe hat eine Fadendichte von 11,5 Schuss- x 12 Kettfäden/cm² und ein Gewicht von 160g/m². Auf den Fäden befindet sich eine Schlichte aus unbekannter Substanz, die mit wässrigen Lösungen und Lösungsmitteln nicht entfernt werden kann (s. auch Kapitel 9.5).⁴⁸³

Wegen des Poisson-Effekts beim Ziehen von Gewebestreifen (das Gewebe zieht sich in der Mitte zusammen) sollten möglichst breite Streifen verwendet werden. Gleichzeitig sollte die Zugmaschine trotzdem das Reißen des kleinen Risses feststellen können. Aus dem Gewebe wurden daher Streifen von 4 x 23 (Schussrichtung) cm entnommen, und in Abstand von 15 cm von der Webkante⁴⁸⁴ 10 Schussfäden mit einer Mikroschere durchschnitten (Schnittlänge ca. 8 mm). Ein Kettfaden wurde an dieser Stelle entfernt, um eine Überlappung zu ermöglichen. Es wurden die Schussfäden zerschnitten, da sie eine geringere Wellung als die Kettfäden aufweisen und daher ein exakteres Abschätzen der Überlappung ermöglichen. Anschließend wurde das Gewebe an der Schnittstelle mithilfe von Gewichten so positioniert, dass eine Überlappung von 1 mm entstand. Dabei entstanden seitlich im unverklebten Gewebe leichte Zwickelfalten.

Aufgrund des hohen Zeitaufwands für die Klebungen wurden diese von mehreren Personen durchgeführt. Dabei stellte sich heraus, dass die Qualität der Klebungen sehr unterschiedlich war. Viele Rissverklebungen mussten daher von vornherein aufgrund zu geringer Überlappung, zu wenig oder zuviel Klebstoff aus der Auswertung der Versuche genommen werden, sodass pro Klebstoff nur noch 7-10 Prüflinge für die Tests zur Verfügung standen. Die Arbeitszeit variierte dabei zwischen 15 Minuten und zwei Stunden pro Riss mit zehn Fäden. Die Qualität der Verklebungen war nicht von der aufgewendeten Zeit abhängig.

Die Prüflinge wurden zehn Wochen lang gelagert und anschließend eine Woche an das Prüfklima von 55% relativer Feuchte und 20 °C angeglichen.

Für den Zugtest wurde prinzipiell die gleiche Einstellung an der Zugmaschine verwendet wie für die Tests an Einzelfäden. Es wurden lediglich breitere Einspannvorrichtungen angebracht, eine Messdose mit größerem Messbereich (bis 2,5 kN) verwendet und bei den angefragten Parametern der Durchmesser der Leinenfäden durch die Angaben 400 mm Breite und 80 g/m² ersetzt. Die Gewebestreifen wurden mittig und fadengerade eingespannt.

Die Zugmaschine sollte im Idealfall schon das Reißen eines einzelnen Fadens bemerken und die Prüfung abbrechen. Dies war jedoch nicht möglich, da an ca. 50 Fäden gleichzeitig gezogen wurde und die Maschine für das Registrieren eines einzelnen gerissenen Fadens so sensibel eingestellt werden musste, dass kleinste Unregelmäßigkeiten im Zugverlauf zum vorzeitigen Abbruch der Prüfung führten.

Daher mussten die Einstellungen etwas „unsensibler“ eingerichtet (siehe Kapitel 9.7 Einstellungen der Zugmaschine) und die Prüflinge während des Zugvorgangs genau beobachtet werden, sodass im Falle eines von der Maschine unbemerkten Öffnen des Risses die Prüfung manuell abgebrochen werden konnte und diese somit immer noch auswertbar war. Dies war bei ca. 50% der Prüflinge der Fall. Dies bedeutet, dass beim Erheben der Höchstzugkraftwerte als subjektiver Faktor der Beobachter der Rissöffnung einen gewissen Einfluss hat.

6.3 Diskussion der Ergebnisse

Bei den Zugtests an Rissverklebungen in Gewebestreifen wurden folgende Beobachtungen gemacht: Beim Prüfen der Referenzproben ohne Schnitt und ohne Verklebung zeigte sich der Einfluss des Poisson-Effekts sehr deutlich. Die äußeren vertikalen Fäden werden bei Zug am stärksten belastet und reißen als erste, da sie durch das Zusammenziehen

⁴⁸³ Freundliche schriftliche Mitteilung von Dr. Kremer, Fa. Kremer Pigmente, Aichstetten am 13.03.2008. Angaben zum Schlichtenmaterial konnten nicht gemacht werden. Eine Analyse war ebenfalls erfolglos.

⁴⁸⁴ In Anlehnung an DIN 53803-2 müssen Gewebeprouben einen Abstand von mindestens 100 mm zur Webkante haben. Diese 10 cm werden in den vorliegenden Versuchen zwar nicht abgeschnitten, jedoch auch nicht in die Zugmaschine eingespannt.

des Gewebestreifens in der Mitte die stärkste Verlängerung erfahren. Dagegen verhalten sich die mittleren vertikalen Fäden des Gewebestreifens, in denen auch der verklebte Riss liegt, länger stabil. Ein erstes Reißen der Fasern konnte bei Zugkräften um 85.000 cN bemerkt werden.

Das Gewebe selbst dehnt sich bei Belastung zunächst schnell aus. Dabei richten sich die vertikalen Fäden so gerade wie eben möglich aus (bis ca. 2200 cN, zu sehen an einer kleinen Stufe im Kurvenverlauf). Erst danach kommt es zur eigentlichen Belastung der Klebestellen. Die Höchstzugkraft auf jedem einzelnen Faden fällt dadurch insgesamt höher aus als bei den einzelnen Fäden der vorhergegangenen Versuchsreihen.

Die beiden genannten Faktoren, der Poisson-Effekt und das anfängliche Dehnen des Gewebes vor der eigentlichen Belastung der Klebung, bergen Schwierigkeiten für die Auswertung der Ergebnisse in sich. Sie sind daher nicht direkt mit den Zugprüfungen an Einzelfäden vergleichbar. Vorher müssten die genaue Zugkraft bis zur geraden Ausrichtung der vertikalen Fäden sowie der Einfluss der Spannungsverteilung im Gewebestreifen herausgerechnet werden.

Das Versagen der Rissverklebungen hängt in den meisten Fällen vom schwächsten verklebten Faden ab. Sobald dieser reißt, erhöht sich die Spannung auf den danebenliegenden Fäden ruckartig, sodass diese ebenfalls reißen und der Riss sich rasch vergrößert. Es wird deutlich, dass äußerste Sorgfalt bei der Verklebung von Rissen geboten ist, da die Belastbarkeit der Klebung von der schwächsten Einzelfadenverklebung abhängig ist. Besonders eindrücklich konnte dieses Phänomen bei den relativ spröden Klebstoffen Epoxidharz und Störleim-Weizenstärkekleister, aber auch bei Mowilith D50 beobachtet werden. Bei den Polyamidverklebungen kam es dagegen zu einer langsameren Abfolge im Nachgeben der einzelnen Klebestellen. Allerdings kann dieses Verhalten angesichts der geringen Anzahl an Prüflingen nur als Tendenz angesehen werden, die weiterer Prüfung bedarf. Für weitere Versuche wäre eine langsamere Zugkraftehöhung anzuraten.

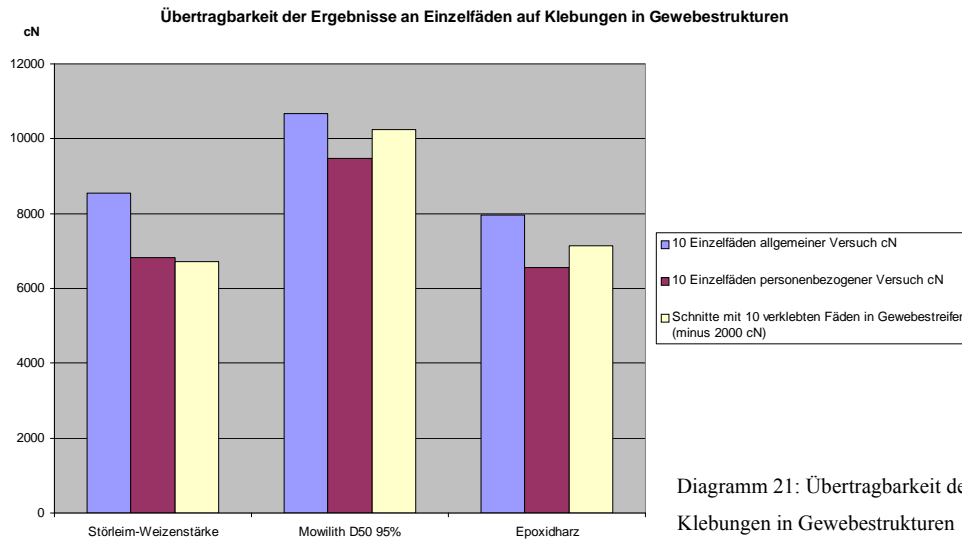
Die Ergebnisse der Höchstzugbelastungen an Rissverklebungen in Gewebestreifen können dagegen noch nicht einmal eine Tendenz für die Übertragbarkeit der Belastbarkeit von Einzelfadenverklebungen auf Verklebungen in Gewebestrukturen aufzeigen. Sie bieten bestenfalls Anhaltspunkte für weitere Forschungen. Dazu wäre die Erhebung von deutlich mehr Datensätzen und ein äußerst genaues Vorgehen bei der Klebung der Risse notwendig. Möglichst sollte eine Person mehrere Risse in einer einheitlichen Güteklasse verkleben.

Die bisher erhobenen Datensätze befinden sich im Anhang (Kapitel 9.6). Bei den Polyamidklebungen kam es zu einer Zunahme der Zugbeständigkeit durch eine längere Lagerung zwischen der Klebung und dem Zugversuch als bei den vorhergegangenen Versuchen. Sie werden deshalb hier nicht aufgeführt.

Bei 2200 cN findet vermutlich die Ausdehnung der Gewebestreifen durch die Ausrichtung der Fäden ein Ende. An diesem Punkt zeigt sich, wie bereits beschrieben, eine kleine Stufe im Kurvenverlauf bei allen Prüfungen. Dieser Wert wird daher von den gemessenen Höchstzugkraftwerten abgezogen. Es ist jedoch nicht sicher, ob die Dehnung nicht auch noch weiter verläuft und somit ein höherer Wert abgezogen werden müsste.

Unter diesen Voraussetzungen ergeben sich folgende Resultate:

Klebstoff	Einzelfäden allgemeiner Versuch cN	Einzelfäden Personenbezogener Versuch cN	Anzahl der verklebten Gewebestreifen	Schnitte Gewebestreifen minus 2200 cN	Belastungs- fähigkeit der Risse in % \ominus	Belastungs- fähigkeit der Risse in % \ominus
Störleim Weizenstärke	854	683	7	6.707	78 %	98 %
Mowilith D50 95%	1067	948	8	10.235	95 %	108 %
Epoxidharz	797	655	12	7.134	89 %	109 %
\ominus bezogen auf 10 Einzelfäden des allgemeinen Versuchs						



Die Ergebnisse können mit zwei unterschiedlichen Referenzwerten interpretiert werden. Wenn die im personenbezogenen Versuch ermittelten Zugbeständigkeiten als Referenzwert für die Belastbarkeit einer einzelnen Verklebung zugrunde gelegt werden, wird deutlich, dass sich die Ergebnisse der Einzelfadenverklebungen in dieser Arbeit direkt etwa 1:1 auf die Belastbarkeit von Fäden in Gewebestrukturen übertragen lassen. Die Schwankungen zwischen 98 und 109 % sind auf die geringe Menge der Prüflinge (7-12) und die unterschiedlichen die Klebung ausführenden Personen (15 Testpersonen) zurückzuführen.

Würde man die Zugbeständigkeit der ersten allgemeinen Versuchsreihe anstatt der personenbezogenen Versuchsreihe als Referenzwert verwenden, ergäbe sich eine Reduktion der Zugbeständigkeit der einzelnen Klebungen im Gewebeverbund auf 95 bis 78%. Es fände also ein tendenzieller Rückgang der Beständigkeit durch die Klebung in einer Gewebestruktur statt. Dieser ließe sich durch die Schwierigkeiten bei der Verklebung im Gewebeverbund durch die eingeschränkte Zugänglichkeit der Fäden und die erschwerte Modellierbarkeit der seitlichen Fasern erklären. Die Höhe der jeweiligen Abnahme in der Zugbeständigkeit besitzt aufgrund der geringen Anzahl an Prüflingen keine Aussagekraft.

Welche der beiden Interpretationsansätze richtig ist, kann nur durch weitere Untersuchungen geklärt werden.

Im Anschluss wurden auch die „mislungenen“ Rissverklebungen getestet und einige interessante Beobachtungen gemacht. Auffällig bei den Klebungen mit Störleim-Weizenstärkekleister war, dass eine Verringerung der Überlappung der Fadenenden auf 0,2 bis 0,5 mm keine Abnahme der Zugbeständigkeit bedeuten muss (Tendenz anhand von 3 Prüflingen). Gleichzeitig ergibt sich aus der Verwendung von übermäßig viel Klebstoff keine automatische Zunahme der Zugbeständigkeit (Tendenz anhand von 2 Prüflingen), sondern es kommt bei diesem Klebstoff vor allem auf die Sorgfalt bei der Verbindung der Fäden an. Einen weiteren Hinweis auf diesen Zusammenhang stellen drei Prüflinge dar, die während der anfänglichen Dehnung unter 2200 cN rissen. Das bedeutet, dass der Riss sich schon öffnete, als die Fäden sich erst gerade im Gewebe ausrichteten. Bei den anderen Klebstoffen trat kein einziger solcher Fall auf. Dies kann nur als eine sehr schlechte Verbindung der Fasern gedeutet werden. Diese Ergebnisse wurden daher aus der Wertung genommen. Vor den Zugversuchen ließ sich diese ungenügende Verbindung der Fasern nicht erkennen. Vermutlich lassen sich mit diesem Klebstoff schnell und leicht optisch befriedigende Resultate erzielen, die trotzdem nur geringen Zugbelastungen standhalten können. Es muss daher umso dringlicher auf die sorgfältige Verarbeitung bei der Klebung geachtet werden.

Empfehlenswert in der Praxis ist eine empirische Kontrolle der Belastbarkeit nach 1-2 Tagen mithilfe einer Sonde.

Auch bei den Klebungen mit Mowilith D50 (95%) war auffällig, dass eine geringere Überlappung keine Abnahme in der Zugfestigkeit nach sich zieht. Diese Tendenz wurde anhand von drei Prüflingen mit 0,5 mm Überlappung festgestellt, die alle über dem Durchschnitt der Verklebungen mit 1 mm Überlappung lagen.

Bei den Epoxidharzklebungen stellte sich heraus, dass die Belastbarkeit in keinem Zusammenhang mit der Überlappung steht. Die Verwendung von übermäßig viel Klebstoff oder die probeweise Anwendung von Druck⁴⁸⁵ während der Aushärtung, die bei Klebungen an Geweben im Gegensatz zu Klebungen an einzelnen Fäden möglich ist, erhöhten die Zugbeständigkeit der Klebungen deutlich.

Insgesamt sollte bedacht werden, dass das in diesem Versuch verwendete Gewebe vergleichsweise weite Abstände zwischen den Fäden hat und daher in ähnlicher Weise wie die Einzelfäden verklebt werden konnte. Auch hatten die verwendeten Fäden in etwa einen ähnlichen Durchmesser. Nur diese Umstände erlauben unter Vorbehalt einen Vergleich mit Werten der Einzelfadenverklebungen. Die Ergebnisse der Versuchsreihe zeigen, dass die leicht unterschiedliche einachsige Zugbelastung eines Fadens in einem Gewebe keinen großen Einfluss auf die Zugbeständigkeit im Vergleich zu einem Einzelfaden hat. Diese Tendenz muss jedoch weiter überprüft werden.

Versuche von Heiber zeigten ein anderes Verhalten von Klebungen in Gewebestreifen: Fäden in verklebten Gewebestreifen hielten nur 35% der Zugbelastung einer vergleichbaren Einzelfadenverklebung aus.⁴⁸⁶ Gründe wurden in der höheren Belastung der äußeren Fäden durch den Poisson-Effekt und in der Art der Messung gesehen. Während bei den Einzelfadenverklebungen eine kontinuierliche Steigerung der Zugkraft stattfand, wurden die Gewebestreifen über mehrere Tage in Stufen weiter belastet. Dies ist ein Hinweis darauf, dass Klebungen zwar kurzfristig hohe Spannungen aushalten können, diese aber auf Dauer nicht halten können und bei stetiger Belastung früher nachgeben.

7 Zusammenfassung der Ergebnisse

Zu Beginn dieser Arbeit wurden die bisherigen Forschungen und Klebstoffe für die Rissverklebung zusammengefasst. Dabei stellte sich heraus, dass bisher eine Vielzahl unterschiedlichster Klebstoffe angewendet wurde.

Als Grundlage für die Versuche wurde ein umfassender, vergleichender Überblick über zahlreiche für die Rissverklebung in Frage kommende Klebstoffe mit ihren wichtigsten Eigenschaften erarbeitet. Gleichzeitig fand eine Auseinandersetzung mit dem zu verklebenden Werkstoff Leinengarn und den theoretischen Grundlagen der Klebung statt.

Es wurde entschieden, die Versuche an einzelnen Fäden durchzuführen, um mögliche Einflüsse des Gewebes, die eine Interpretation erschweren könnten, auszuschließen. Um die Versuche reproduzieren und weiterführen zu können, wurde ungealtertes Fadenmaterial verwendet.

Durch den allgemeinen Vergleich der Zugbeständigkeit von Klebungen mit über 30 verschiedenen Klebstoffzusammensetzungen im ersten Teil der Versuche wurde erstmals eine Übersicht über die Zugbelastbarkeit einer breiten Klebstoffauswahl erstellt. Alle Versuche wurden statistisch ausgewertet. Dabei stellte sich heraus, dass Acryldispersionen und Acrylschmelzen nur geringfügig belastbar sind. Unter den Schmelzklebstoffen hatte das Polyamid-Textil-Schweißpulver der Firma Lascaux die höchste Zugbeständigkeit, trotz niedrigerer Schmelztemperatur und vermutlich auch geringerer Kettenlänge als andere Polyamidtypen. In Zusammenhang mit Störleim wurden verschiedene Modifikationen getestet. Am belastbarsten erwies sich die häufig verwendete Mischung aus Störleim mit Weizenstärkekleister. Die Zugbeständigkeit kann durch Trocknung ohne Wärmequelle weiter verbessert werden. Aber

⁴⁸⁵ Versuchsweise wurden zwei Rissverklebungen direkt nach der Klebung mit Silikonpapier und 260g-Eisengewichten eine Stunde lang beschwert. Das Gewicht verteilte sich auf eine Fläche von 13,13 cm², es lag also eine Belastung von 19,8 g/cm² vor.

⁴⁸⁶ HEIBER 1996, S.35.

auch Störleim allein, wenn er in Gelform und nicht als Lösung aufgetragen wird, kann ausgesprochen hohe Festigkeitswerte erzielen, die sogar über denen von Störleim-Reisstärkekleister liegen. Die modifizierten Störleimlösungen ergaben insgesamt hohe Zugbeständigkeiten. Sie wurden nur von der Polyvinylacetatdispersion Mowilith D50 übertroffen. Die Zugfestigkeit der Epoxidharzverklebungen mit Uhu-plus-schnellfest lag unerwarteterweise unter der Zugfestigkeit von Störleim-Weizenstärkekleister-Klebungen. Optisch am vorteilhaftesten erwies sich eine Mischung aus Störleim mit JunFunori, bei der allerdings Einbußen in Bezug auf die Zugbeständigkeit in Kauf genommen werden müssen.

Darauf aufbauend wurden mit Störleim-Weizenstärke, Polyamidpulver, Mowilith D50 und Epoxidharz weitere Versuche durchgeführt.

In einem personenbezogenen Versuch mit mehreren „Test-Verklebern“ stellte sich heraus, dass die Klebungen bei allen Klebstoffen stark personen-abhängig sind. Die Verklebung von Rissen sollte daher immer mit größter Sorgfalt erfolgen. Insgesamt stellte sich heraus, dass Störleim-Weizenstärkekleister sehr gute Verarbeitungseigenschaften aufweist und nach der Trocknung relativ gute optische Eigenschaften besitzt. Die Klebungen sind zudem jederzeit reversibel. Vor allem die Modellierung der Klebestelle ist bei diesem Klebstoff ausschlaggebend für die spätere Zugfestigkeit. Bei Verwendung von Mowilith D50 ist ein sehr schnelles und präzises Vorgehen bei der Klebung nötig. Daher erfordert dieser Klebstoff einige Übung, die durch die höchste Zugbeständigkeit der getesteten Klebstoffe belohnt wird. Ein großer Vorteil des Polyamidpulvers ist die einfache und schnelle Verarbeitung. Nachteilig ist die Farbtonvertiefung an der Klebestelle. Die Epoxidharzklebungen bereiteten vor allem an einzelnen Fäden Schwierigkeiten, da eine Fixierung der Klebestellen bis zur Aushärtung nicht möglich war. Die benötigte Klebstoffmenge wird schnell überschätzt. Die größte Schwachstelle der Epoxidharzklebungen ist die Adhäsion.

Bei den Versuchen zum klimaabhängigen Verhalten der Verklebungen stellte sich heraus, dass es entgegen den Erwartungen bei Störleim-Weizenstärkekleister zu einer vergleichsweise geringen Abnahme der Zugbeständigkeit durch zyklische Klimaschwankungen kam. In besonders feuchtem Klima kam es bei diesem Klebstoff sogar zu der geringsten Abnahme der Zugbeständigkeit unter allen Klebstoffen. In trockenem Klima verbesserte sich die Beständigkeit deutlich. Damit verhält sich die Störleim-Weizenstärkekleistermischung in diesen Versuchen besser als allgemein angenommen. Bei Mowilith D50 kam es zu einem stärkeren Nachlassen der Zugbeständigkeit nach den zyklischen Klimabelastungen. Auch durch den Einfluss des feuchten Klimas verringerte sich die Zugbeständigkeit stärker als bei Störleim-Weizenstärkekleister. In trockener Umgebung steigt die Zugbeständigkeit auch bei diesem Klebstoff. Die Polyamidklebungen nahmen im Verlauf der Wartezeiten zwischen den Versuchen an Zugfestigkeit beständig zu. Dies ist durch eine Rekristallisation und damit Zunahme an Kohäsion zu erklären. Auch nach den zyklischen Klimaschwankungen blieb diese Tendenz unverändert. Eine dramatische Abnahme der Zugbeständigkeit fand erst bei länger andauerndem sehr trockenem oder sehr feuchtem Klima statt. Bei Epoxidharz war nach der zyklischen Klimabelastung die geringste Abnahme an Zugfestigkeit festzustellen. Ein starkes Nachlassen war dagegen bei der Konditionierung in feuchtem Klima zu beobachten. Eine Erklärung für dieses Phänomen konnte nicht gefunden werden. In trockenem Klima kam es zu einer deutlichen Zunahme der Höchstzugkraft.

Bei der Prüfung der Anwendbarkeit der Ergebnisse auf Klebungen im Gewebeverbund stellte sich heraus, dass keine verlässlichen Angaben über die maximalen Spannungswerte, denen eine Rissverklebung ausgesetzt sein kann, gemacht werden können. Daher sollte eine möglichst hohe Belastbarkeit angestrebt werden. Die Verklebung von Schnitten in Geweben ergab, dass aufgrund der erschwerten Erreichbarkeit der einzelnen Fäden von allen Seiten mit einer Abnahme der Höchstzugkraft von etwa 20% pro Faden zu rechnen ist.

Abschließend soll noch einmal darauf hingewiesen werden, dass bei den Messungen Zugkräfte nur in einer Richtung ausgeübt wurden, und nicht in mehrere Richtungen, wie es bei einem Gemälde der Fall ist. Außerdem fanden statische Belastungen, die durch die Aufspannung des Gemäldes auf jedem Faden lasten, keine Berücksichtigung. Trotz dieser Einschränkungen bietet die Arbeit erstmalig einen umfassenden Überblick über die Eigenschaften einer Vielzahl von Klebstoffen für die Rissverklebung an Leinengeweben.

8 Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit konnten einige geeignete Klebstoffe für die Rissverklebung getestet werden. Es sind jedoch weitere Modifikationen und andere Materialien denkbar. So sollte z.B. die Auswahl der Polyvinylacetate nochmals im Hinblick auf die am Markt erhältlichen Produkte verschiedener Hersteller ergänzt werden. Forschungen zum Aspekt der Zusammensetzung und den Alterungseigenschaften der PVAC-Dispersionen für die Anwendung in der Restaurierung wären dringend notwendig, da die bisher gebräuchlichen Produkte nicht mehr produziert werden. Ebenso ist hier der Einsatz von Wärme zur Verbesserung der Zugbeständigkeit von PVAC-Klebung von Interesse, der in dieser Arbeit leider nur ansatzweise, aber mit guten Ergebnissen getestet wurde.

Auch bei der Gruppe der Epoxidharze könnten weitere Tests mit verschiedenen Produkten aufschlussreich sein, weil durchaus andere Zug- und Klimabeständigkeiten als mit dem in der vorliegenden Arbeit getesteten UHU schnellfest erreicht werden könnten. Auch durch die Modifikation mit Füllstoffen oder Veränderungen der Klebetechnik könnten Verbesserungen erreicht werden.

Gerade das als klimabeständig geltende Epoxidharz stellte sich in den Versuchen dieser Arbeit als ungeeignet bei hohen relativen Feuchten heraus. Dies gilt zumindest für den Typ Uhu schnellfest. Die Tendenz sollte aber auch an anderen in der Restaurierung verwendeten Epoxidharzen überprüft werden.

Denkbar wären weiterhin andere Celluloseether als Verdickungsmittel für Störleim. Geeignet erscheinen vor allem hochmolekulare Methylcellulosen. Dabei sollten mehrere Typen und deren notwendige Konzentration überprüft werden. Zudem wäre die Modifikation von Störleim mit Honig bzw. Glucose sehr interessant, da sie eine höhere Flexibilität erzeugen und Spannungen bei Feuchtigkeitswechseln verringern sollen.⁴⁸⁷ Auch Zusätze, die Störleim zum Vernetzen bringen und damit die Kohäsion erhöhen, wie Glanzer und Wuntschek es vorschlagen,⁴⁸⁸ könnten überprüft werden. Nachteilig wären dabei die verringerte Wiederarbeitbarkeit und Reversibilität der Klebungen. Ebenfalls lohnenswert könnte die Beschäftigung mit der Verbesserung der Zugbeständigkeit von Störleim-Weizenstärkekleister-Verklebungen durch Trocknung ohne Zuhilfenahme einer Wärmequelle sein. Mögliche Verbesserungen der Klebetechnik wären z.B. die Anwendung von Druck oder die Beschleunigung der Trocknung ohne den Einsatz von Wärme. Auch könnte die Verwendung von Gelatine statt Störleim ausprobiert werden. Eine Mischung aus Gelatine und Weizenstärkekleister ist laut Ackroyd flexibler und klebt besser als Störleim-Weizenstärkekleister.⁴⁸⁹

Bei der Gruppe der Polyamidschmelzklebstoffe sollte die Abhängigkeit der Zugfestigkeit von der Wartezeit untersucht werden. Es stellen sich hierbei folgende Fragen: Wann und wie lange nimmt Polyamid an Festigkeit zu? Welches ist der höchste Wert, der erreicht werden kann? Nimmt die Festigkeit nach einem Höhepunkt durch Alterung wieder ab? Zudem sollte der Aspekt der Abnahme an Zugfestigkeit bei hoher relativer Feuchte weiter erforscht werden. Dabei ist vor allem interessant, bei welchem Klima eine Abnahme der Zugbeständigkeit eintritt und wie lange sich die Klebung in

⁴⁸⁷ GLANZER 1995, S. 79.

⁴⁸⁸ Vgl. GLANZER 1995; WUNTSCHKE 1997.

⁴⁸⁹ Vgl. ACKROYD 1995, S. 87 (untersucht wird die Eignung als Doublierklebstoff).

diesem Klima befunden haben muss. Auch der Vergleich mit anderen Polyamidtypen könnte aufschlussreich sein.⁴⁹⁰ Bei weiteren Tests mit Polyamiden sollten unbedingt auf gleich lange Lagerung bei gleichen Klimabedingungen geachtet werden.

Aufgrund der schlechten Ergebnisse der Acryldispersionen und Acrylschmelzklebstoffe könnten hochkonzentrierte Lösungen von Paraloid B72 und Degalan PQ611 auf ihre Eignung hin überprüft werden. Es ist anzunehmen, dass Acrylharzlösungen eine bessere Adhäsion und Kohäsion als Dispersionen erzeugen und tiefer eindringen als die Schmelzklebstoffe. Eventuell könnten die Klebungen mit einer Heiznadel nachbearbeitet werden. Massa schlägt die Verwendung von thermoplastischen Poly-urethandispersionen vor.⁴⁹¹ Auch diese könnten in weitere Versuche mit aufgenommen werden.

Im Ausblick auf zukünftige Forschung wäre es wünschenswert, die Eigenschaften aller in der Restaurierung üblichen Klebstoffe mit vergleich-baren Messungen zu untersuchen.

Zudem könnten Tests mit Klimabelastungen und Zugbelastungen bei extrem hohen und niedrigen Feuchtigkeitswerten auch für die Klebstoffe erfolgen, die nach den Vorversuchen nicht weiter getestet wurden. Genauere Untersuchungen zu den Veränderungen der Zugbeständigkeit bei verschiedenen Luftfeuchtigkeiten wären wünschenswert. Aufschluss könnte eine Testreihe mit stufenweise erhöhten bzw. verringerten Luftfeuchtigkeiten und Zugtests bei allen Stufen geben.

Auch die Abnahme bzw. Zunahme der Zugbeständigkeit der Klebstoffe im zeitlichen Verlauf könnte genauer untersucht werden. In den vorliegenden Zugprüfungen wurden auch Dehnbarkeit (prozentuale Dehnung am Bruchpunkt) und Elastizität (E-Modul) der Klebungen gemessen. Eine Auswertung der Ergebnisse hätte den Umfang der Arbeit überstiegen, kann aber jederzeit anhand der Wertetabellen und Diagramme in Kapitel 9.8 durchgeführt werden. Dehnbarkeit und Elastizität haben allerdings nur bedingte Aussagekraft, da immer der gesamte Prüfling, also Klebung und Leinenfaden, gedehnt wurden.

Des Weiteren konnte die Thematik der Biegesteifigkeit und Reversibilität der Klebstoffe in dieser Arbeit nicht näher untersucht werden und bietet somit Raum für weitere Untersuchungen. Auch die Schälfestigkeit der Klebungen ist von Interesse, da sich bei hohen Luftfeuchtigkeiten die Umschlingungswinkel der Fäden im Gewebeverbund erhöhen und somit Schälkräfte auftreten können.

Der durchaus wichtigen Frage nach der Veränderung der Zugbeständigkeit bei veränderter Belastungsart sollte weiter nachgegangen werden. So sind Tests bei besonders langsamer oder besonders schneller Zuggeschwindigkeit denkbar, aber auch die Veränderung der Belastbarkeit durch Vibrationen, wie sie z.B. bei Transporten auftreten. Die Langzeitbelastbarkeit der Klebungen ist von besonderem Interesse. Für weiterführende Untersuchungen wurde im Rahmen dieser Arbeit von vier Klebstoffen jeweils 15 Prüflinge mit jeweils acht Gramm Gewicht am unteren Ende für einen Langzeitversuch angefertigt.

Entsprechend einer aufgespannten Leinwand sollten die Gewichtsbelastungen nicht nur in vertikaler, sondern auch in horizontaler Richtung erfolgen. Interessant wäre daher das Testen von Verklebungen in Geweben mit biaxialen Messgeräten.

Ein weiterer interessanter Punkt ist die Verteilung der Klebstoffe in der Leinenfaser und die Frage, inwieweit sie eindringen und wie gleichmäßig sie verteilt sind. Dafür könnten die Klebstoffe oder Klebungen angefärbt und im Mikroskop betrachtet werden.

⁴⁹⁰ PLÖTZ 2002 (S. 43) schlägt auch eine Copolyesterfolie als möglichen Schmelzklebstoff vor. Die Firma Schaetti bietet weitere thermoplastische Klebepulver mit niedrigen Siegeltemperaturen an.

⁴⁹¹ MASSA et al. 1991, S. 174.

Worch schlägt weiterhin die Verbesserung der Adhäsion der Klebstoffe durch elektrostatische Aufladung vor.⁴⁹² Auch dieses Vorgehen könnte weiter untersucht werden.

Diese Fragestellungen sollten möglichst am gleichen Fadenmaterial geklärt werden, damit die Ergebnisse vergleichbar sind. Zusätzlich könnte die Veränderung der Zugbelastbarkeit bei verschiedenen Fadenstärken aufschlussreich sein, da sich bei feineren und dickeren Fäden unterschiedliche Probleme beim Klebemittelauftrag und der Verarbeitung ergeben. Außerdem kann mit der Erprobung der Klebstoffe an anderen Fasermaterialien wie Baumwolle, Seide oder Kunstfasern begonnen werden. Unterschiedliche Überlappungen oder „Stoß-auf-Stoß-Klebungen“ ohne Überlappung könnten ebenfalls Gegenstand weiterer Forschung sein. Auch die Thematik der Adhäsion auf ölgetränkten oder wachsgetränktem Fadenmaterial ist ein weiteres Forschungsfeld. Desgleichen sollte der Einfluss von Vorfestigungen mit verschiedenen Materialien auf die Klebungen untersucht werden.

Ein grundlegendes Thema weiterer Forschungen sollte außerdem die Klebung von Rissen in Geweben mit Malschichten sein. Interessant ist hier vor allem, wie sich die Zugbelastung durch die steifere „Beschichtung“ verändert. Auch der Frage, wie steif ein Klebstoff sein muss, damit der verklebte Riss sich nicht nach vorne oder hinten markiert, kann nur an Geweben mit Malschicht nachgegangen werden. Ebenfalls sollte die Veränderung der Wasserdampfdiffusion untersucht werden. Schlussendlich stellt sich die Frage nach der Belastung durch Erschütterungen und Feuchtigkeit bei der Kittung auf Rissverklebungen. Insgesamt zeigt sich, dass zum Thema der Rissverklebung noch viele Fragen für weitere Forschungen offen bleiben.

⁴⁹² WORCH 2006, S. 28f.

9.1 Bibliographie

ACKROYD 1995

Paul Ackroyd: Glue-paste lining of paintings: an evaluation of the bond performance and relative stiffness of some glue-paste linings. In: Backing and Lining, UKIC Conference, (Totton, 7-8 Nov. 1995). Hrsg. von IIC London 1995, S. 83-91.

ARSLANOGLU 2003

Julie Arslanoglu: Evaluation of the use of Aquazol as an adhesive. In paintings conservation. WAAC newsletter Vol. 25, Nr. 2, 2003, S. 12-18.

ARSLANOGLU 2004

Julie Arslanoglu: Aquazol as used in conservation practise. WAAC newsletter Vol. 26, Nr. 1, 2004, S. 10-15.

BECKER 2002

Laurence Becker: Möglichkeiten und Grenzen der Einzelfadenverklebung in der Textilkonservierung. Diplomarbeit Fachhochschule Köln 2002.

BEIER 2000

Viola Beier: Auswirkungen von Nassreinigungen auf gealtertes Leinen. Diplomarbeit Fachhochschule Köln 2000.

BEINER-BÜTH, BECKMANN 2007

Silke Beiner-Büth, Steffanie Beckmann: Faserbrei zur Schließung klaffender Risse - Ein Werkstattbericht. In: VDR-Beiträge zur Erhaltung von Kunst- und Kulturgut, Heft 1/2 2007, S. 45-54.

BERGER 1975

Gustav A. Berger: Heat-seal lining of a torn painting with BEVA 371. In: Studies in Conservation 20, 1975, S. 126-151.

BERGER 1976

Gustav A. Berger: Formulating Adhesives for the Conservation of Paintings. In: Conservation and Restoration of Pictorial Art, Hrsg. von Norman Brommelle. London 1976, S. 169-180.

BERGER 1984

Gustav A. Berger: Leserbrief an Maltechnik/ Restauro, Heft 2/1984, S. 68-71 und Stellungnahme dazu in Maltechnik /Restauro Heft 3/1984, S. 70.

BERGER, RUSSELL 1984

Gustav A. Berger, William H. Russell: The new stress tests on canvas paintings and some of their implications on the preservation of paintings. In: Preprints of the ICOM Committee for Conservation (Kopenhagen, 10 - 14 September 1984), Bd. 2. Paris 1984, S. 7-9.

BERGER, RUSSELL 1988

Gustav A. Berger, William H. Russell: An evaluation of the preparation of canvas paintings using stress measurements. In: Studies in Conservation, Vol. 33, 1988, S.187-204.

BERGER, RUSSELL 1993

Gustav A. Berger, William H. Russell: Tears in canvas paintings. Resulting stress changes and treatment. In: ICOM Committee for Conservation 6th triennial meeting (Washington DC 22-27.08.1993). Hrsg. von Janet Bridgland. Paris 1993, S. 113-117.

BERGER, RUSSELL 2000

Gustav A. Berger, William H. Russell: Untersuchungen zum Einfluss der Umwelt auf die Erhaltung von Leinwandgemälden. In: Restauro 5, 2000, S. 344-347.

BODECHTEL 2000

Steffi Bodechtel: Über Polyamide in der Restaurierung: Betrachtungen zu Polyamid-Textilschweißpulver. Seminararbeit Hochschule für Bildende Künste Dresden 2000.

BRACHERT 1992

Thomas Brachert: Vom Positivismus der Postmoderne, Reflexionen zur Konservierung von Leinwandgemälden. In: *Restauro* 5/1992, S. 332, und Leserbrief dazu von Winfried Heiber in: *Restauro* 1/1993, S. 2.

BRACHT et al. 2003

Elisabeth Bracht, Irene Glanzer, Louise Wijnberg: Barnett Newman's Cathedra: The restoration of slash damages in a colourfield painting. In: *Alternatives to lining*. Hrsg. von Mary Bustin und Tom Caley. London 2003, S. 21-27.

BRAKEBUSCH 1996

Börris Brakebusch: Das mechanisch-physikalische Verhalten von Leinwandbildern. Diplomarbeit Fachhochschule Köln 1996.

BRANDIS 1990

Robert L. Brandis: Animal Glue. In: *Handbook of Adhesives*. Hrsg. von Irving Skeist et al.. New York 1990, S. 123-134.

BRYDSON 1999

John A. Brydson: *Plastic materials*. Oxford⁷ 1999.

CEDERHOLM 1985

Kermit Cederholm: The treatment of small tears in canvas paintings. Postgraduate diploma Courtauld Institute London 1985.

CELANESE <www.celanese.com>

Celanese Emulsions GmbH (Hrsg.): Produktinformation zu Mowilith DHS S1

<http://www.celanese.com/emulsions_products_tech_dhss1.pdf> (07.03.2008),

Produktinformation zu Mowilith LD 167: <http://www.celanese.com/emulsions_products_tech_ld167.pdf>

(07.03.2008), Produktinformation zu Mowilith D50: <http://www.celanese.com/mowilith_d_50_en.pdf> (07.03.2008).

CHIU et al. 1986

Thomas T. Chiu, Bruce P. Thill, William F. Fairchok: Poly(2-ethyl-2-oxazoline): A new water- and organic-soluble adhesive. In: *Advances in Chemistry* No. 213, Washington DC 1986, S. 425-432.

COERDT 2007

Andrea Coerd: Zum Leimen zu gebrauchen. Untersuchungen zu kaltflüssigen Glutinleimen - Teil 1. In: *Restauro* 1, 2007, S. 32-38.

DANIELS 1995

Vincent Daniels: The reversibility of starch paste. In: *Lining and Backing*, Totton 1995, S. 72-76.

DEGUSSA <www.degussa.de>

Produktinformation zu Degalan PQ611: <[http://www.binders-and-additives.com/bindingsadditives/MCMSbase/Pages/ProvideResource.aspx?respath=/NR/rdonlyres/978B7792-725B-](http://www.binders-and-additives.com/bindingsadditives/MCMSbase/Pages/ProvideResource.aspx?respath=/NR/rdonlyres/978B7792-725B-46FB-80E2-149859C5EAF2/0/DEGALANPQ611.pdf)

46FB-80E2-149859C5EAF2/0/DEGALANPQ611.pdf> (23.04.2008).

DERSCHAU, UNGER 1998

Dorit von Derschau, Joachim Unger: Epoxidharz-Restaurierungen- zum Problem der Entfernung. In: *Restauro* Nr. 7, 1998, S. 486-493.

DeWITTE, COEN-BOGAERTS 1980

DeWitte, Coen-Bogaerts: Vergelijkend Onderzoek von enkele witte Houtlijmen, IRPA Bulletin XVIII, 1980-81, S. 131-142.

DIETMANN 1982

Herbert Dietmann: Einführung in die Elastizitäts- und Festigkeitslehre, Stuttgart, 1982.

DIN 53 804-1: Statistische Auswertungen, Teil 1: Kontinuierliche Merkmale.**DIN EN ISO 139: Normalklimate für die Probenvorbereitung und Prüfung (inkl. DIN EN ISO 139/A1).**

DIN EN ISO 2062:1995 Garne von Aufmachungseinheiten- Bestimmung der Höchstzugkraftdehnung von Garnabschnitten.

DOLEZEL 1978

Bretilav Dolezel: Die Beständigkeit von Kunststoffen und Gummi. München 1978.

DOMININGHAUS et al. 2005

Hans Domininghaus, Peter Elsner, Peter Eyerer, Thomas Hirth: Die Kunststoffe und ihre Eigenschaften. 6., neu bearbeitete und erweiterte Auflage. Berlin 2005.

DOWN 1984

Jane L. Down: The yellowing of epoxy resin adhesives; report on natural dark ageing. In: Studies in Conservation 29/1984, S. 63-76.

DOWN et al. 1996

Jane L. Down, Maureen A. MacDonald, Jean Tétrault, R. Scott Williams: Adhesive testing at the Canadian Conservation Institute. An evaluation of selected Poly- (VinylAcetate) and Acrylic adhesives. In: Studies in Conservation 41, 1996, S. 19-44.

DUFFY 1989

M. C. Duffy: A study of acrylic dispersions used in the treatment of paintings. In: Journal of the American Institute for Conservation, Vol. 28, Nr. 2, 1989, S. 67-77.

EIPPER 1993

Paul-Bernhard Eipper: Die Reinigung von Gemäldeoberflächen mit Tensiden / Der Einsatz von modifizierten Polyvinylacetaten zur Konservierung von textilen Bildträgern, Bern 1993.

ERHARDS 1993

Susanne Erhards: Doublierungen und alternative Doublierungsmaßnahmen mit Kunstharzdispersionen unter Berücksichtigung ihres Alterungsverhaltens, Diplomarbeit Fachhochschule Köln 1993.

ESSERS 1985

Günter Essers: Verschweißen von Gewebeträgerrissen mittels Lötnadel. In: Restauro 2, 1985, S. 42-43.

FELLER 1994

Robert L. Feller: Accelerated aging- photochemical and thermal aspects. Research in conservation 4. USA (ohne genauere Ortsangabe) 1994.

FELLER, WILT 1990

Robert L. Feller, Myron H. Wilt: Evaluation of cellulose ethers for conservation. Research in Conservation 3. USA (ohne genauere Ortsangabe) 1990.

FROMM 1991

Bruno Fromm: Überlegungen zum Einsatz von Wärme in der Gemälderestaurierung, Diplomarbeit Fachhochschule Köln 1991.

GABLER 1980/81

Wolfram Gabler: Eine Möglichkeit der Restaurierung von Rissen in Leinwandgemälden ohne Doublierung. Dargestellt am Beispiel des Gemäldes „Die Nacht“ von Ferdinand Hodler. In: Mitteilungen DRV, 1980/81, S. 22-25.

GEHMAN 1990

David R. Gehman: Acrylic adhesives. In: Handbook of Adhesives. Hrsg. von Irving Skeist et al., New York 1990, S. 437-450.

GEIGER, MICHEL 2005

Thomas Geiger, Françoise Michel: Studies on the polysaccharide JunFunori used to consolidate matte paint. In: Studies in Conservation Vol. 50, No. 3, 2005, S. 193-204.

GLANZER 1995

Irene Glanzer: Ein Klebstoffsystem für Rissvernahtung am Gemälde. Diplomarbeit Hochschule für Angewandte Kunst Wien 1995.

GRELLMANN, SEIDLER 1998

Wolfgang Grellmann, Sabine Seidler: Deformation und Bruchverhalten von Kunststoffen, Berlin 1998.

HABEL-SCHABLITZKY 1992

Andrea Habel-Schablitzky: Fischblasenleim- Geschichte und Eigenschaften sowie Anwendung in der Holzrestaurierung. Diplomarbeit Köln 1992.

HABENICHT 1997

Gerd Habenicht: Kleben. Grundlagen, Technologie, Anwendungen. 3. völlig neu bearbeitete und erweiterte Auflage, Berlin 1997.

HAUPT 2000

Tobias Haupt: Zubereitung von Störleim – Auswirkung der Zubereitungstemperatur und –zeit auf Viskosität, Geliervverhalten und Molekulargewicht. Diplomarbeit Staatliche Akademie der Bildenden Künste Stuttgart 2000.

HAUSMANN 2005

Ina Hausmann: Abnahme eines gealterten Polyvinylacetatüberzuges am Gemäldezyklus des Ratsaals zu Buxtehude, Diplomarbeit Fachhochschule Köln 2005.

HEDINGER 1997

Daniela Hedinger: Rissverwundung am Gemälde, Diplomarbeit Staatliche Akademie der Bildenden Künste Stuttgart 1997.

HEDLEY 1975

Gerry Hedley: Some empirical determinations of the strain distribution of stretched canvases. In: Proceedings of the ICOM Committee for Conservation (Venedig 6 - 11 September 1975), Paris 1975, S.75/11/4-1 bis 75/11/4-17.

HEDLEY 1988

Gerry Hedley: Relative humidity and the stress/strain response of canvas paintings: Uniaxial measurements of naturally aged samples. In: Studies in Conservation 33, 1988, S. 133-148.

HEDLEY 1993

Gerry Hedley: The practicalities of the interaction of moisture with oil paintings on canvas. In: Measured opinions. Collected papers on the conservation of paintings. Hrsg. von Caroline Villers. London 1993, S. 112-122.

HEIBER 1983/84

Winfried Heiber: Kunstgriffe, Tüfteleien und Hilfsmittel aus Gemälderestaurierungswerkstätten. In: Mitteilungen DRV, 1983/84, S. 34-41.

HEIBER 1996

Winfried Heiber: Die Rissverklebung. In: Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung 1, 1996, S. 117-146.

HEIBER 2003

Winfried Heiber: The thread-by-thread tear mending method. In: Alternatives to lining, Hrsg. von Mary Bustin und Tom Caley, London 2003, S. 40-45.

HEISTERÜBER 1985

Julia Heisterüber: Restauration des toiles déchirées. Etude comparative de différents types de déchirures, d'adhésifs et de méthodes de collage. Diplomarbeit École Nationale Supérieure des Arts Visuelles de la Chambre, Brüssel 1985.

HILBERT 1996

Günther S. Hilbert: Sammlungsgut in Sicherheit- Beleuchtung und Lichtschutz, Klimatisierung, Sicherungstechnik, Brandschutz. Berlin 1996.

HOFMANN 2003

Sylvia Hofmann: Konservierung und Restaurierung des Leinwandgemäldes „Ansicht der Jesuitenniederlassung Ebersberg“ zwischen 1710-1733, unbekannter Künstler, Bayrisches Nationalmuseum (praktischer Teil), Testreihen zur Homogenität, Stabilität und Klebefähigkeit eines Stärkekleister-Störleim-Gemisches in Abhängigkeit vom Herstellungsverfahren des Kleisters (theoretischer Teil). Diplomarbeit Hochschule für Bildende Künste Dresden 2003

HORIE 1994

Charles Velson Horie: Materials for Conservation - Organic consolidants, adhesives and coatings. 4. überarbeitete Auflage, London 1994.

HOWELLS et al. 1984

Rachel Howells, Aviva Burnstock, Gerry Hedley, Stephen Hackney: Polymer dispersions artificially aged. In: Adhesives and consolidants, preprints of the ICOM Committee for conservation (Copenhagen, 10 - 14 September 1984). Paris 1984, S. 36-43.

KÄSSBERGER et al. 1998

Michael Käßberger, Guido Dessauer, Helmut Stark: Der Grazer Alterungstest. Der dynamische Alterungstest von Papier und Karton. In: Das Papier 9, 1998, S. 529-531.

KEYSERLINGK 1990

Michaela Keyserlingk: The use of adhesives in textile conservation. In: ICOM Committee for Conservation 9th triennial meeting (Dresden 26 - 31 August 1990), Vol. I., Paris 1990, S. 307-312.

KOCH 1994

P.A. Koch: Flachs sowie andere Bast- und Hartfasern, aus: Faserstoff-Tabellen nach P.A. Koch, Institut für Textiltechnik der RWTH Aachen, Aachen 1994, S. 765-785.

KREMER <www.kremer-pigmente.de>

Kremer Pigmente GmbH & Co. KG (Hrsg.): Produktinformation 63477 Fu-No-Ri. <<http://kremer-pigmente.de/shopint/PublishedFiles/63477e.pdf>> (15.01.2008),

Produktinformation Mowilith DMC2: <<http://www.kremer-pigmente.de/shopint/PublishedFiles/67040.pdf>>

(27.04.2008), Produktinformation zu Paraloid B72: <<http://www.kremer-pigmente.de/67400.htm>> (29.04.2008).

KRUGER, LACOURSE 1990

Leo Kruger, Norman Lacourse: Starch based adhesives. In: Handbook of Adhesives, New York 1990, S. 153-166.

KUDRAJAWZEW 1945

E. W. Kudrajawzew: Ausbessern von Rissen und Löchern in der Bildleinwand. In: Die Technik des Gemälderestaurierens. Leipzig 1945, S. 44-53.

KUIPER, HESTERMANN 1976

L. Kuiper, W. Hestermann: Restauratieverslag van Rembrandts Nachtwach, Bulletin van het Rijksmuseum 24/1-2, Bd.1, 1976, S. 14-48.

LANZ 1996

Diane Lanz: Vergleichende Untersuchungen nähtechnischer und klebetechnischer Methoden als Sicherungsmöglichkeit für bemalte Textilien. Diplomarbeit Fachhochschule Köln 1996.

LASCAUX <www.lascaux.ch>

Lascaux Alois K. Diethelm AG (Hrsg.): Produktinformation JunFunori®.

<http://www.lascaux.ch/pdf/de/produkte/restauro/cellulosen/58352.01_jun_funori.pdf> (15.01.2008),

Produktinformation zu Lascaux 498HV und Polyamidschweißpulver:

<http://www.lascaux.ch/pdf/de/produkte/restauro/2_kleber_klebewachse.pdf> (09.04.2008).

LATZKE 1988

Peter M. Latzke: Textile Fasern. Rasterelektronenmikroskopie der Chemie- und Naturfasern. Frankfurt a.M. 1988.

LISZEWSKA 2005

Weronika Liszewska: Über Japanische Weizenstärke und deren Modifizierung mit JunFunori. In: PapierRestaurierung Vol. 6, 2005, S. 45-49.

MAGER 2007

Simone Mager: Leinwand ohne Spannrahmen in der zeitgenössischen Kunst - Bildträger mit besonderen Eigenschaften und Anforderungen. Diplomarbeit Fachhochschule Köln 2007.

MASSA et al. 1991

V. Massa, G. Scicolone, E. Cozzi: Ein neuer Polyurethanklebstoff für die Textilrestaurierung. In: Restauro 3, 1991, S. 173-178.

McGLINCHEY 1993

Christopher W. McGlinchey: The physical aging of polymeric materials. In: Saving the twentieth century-The conservation of modern materials. Ottawa 1993, S. 113-121.

MECKLENBURG, TUMOSA 1991

Marion F. Mecklenburg, Charles S. Tumosa: The mechanical behaviour of paintings subjected to changes in temperature and relative humidity. In: Art in transit, National Gallery of Art, Washington 1991, S. 173-216.

MICHEL et al. 2002

Françoise Michel, Thomas Geiger, Anita Reichlin, Geneviève Teoh-Sapkota: Funori, ein japanisches Festigungsmittel für matte Malerei. In: Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung Nr. 16, 2006, S. 257-275.

MICHEL et al. 2006

Françoise Michel, Anita Wanner, Robert Tobler: Funori-Kompressen, Oberflächenreinigung und Reduzierung von Wasserrändern. In: Restauro 5, 2006, S. 319-327.

MILLS, WHITE 1987

John S. Mills, Raymond White: Proteins. In: The organic chemistry of museum objects. London 1987.

NÄGLER 2005

Christina Nägler: Risse im Polyamidgewebe der Farbraumkörper von Gotthard Graubner. Möglichkeiten und Grenzen ihrer Verklebung. Diplomarbeit Fachhochschule Köln 2005.

NGUYEN 2005

Thi-Phuong Nguyen: Gelatin as Adhesive. A short Introduction into a Promising Material. In: PapierRestauration – Mitteilungen der IADA (Internationale Arbeitsgemeinschaft der Archivs-Bibliotheks- und Graphikrestauratoren), No. 4, 2005, S. 31-34.

NICOLAUS 1996

Knut Nicolaus: Handbuch der Gemälderestaurierung, Köln 1996.

OESS 1995

Eva Oess: Celluloseether als Festigungsmittel für Grundierungs- Mal- und Fassungsschichten an Gemälden, Skulpturen und dreidimensionalen Kunstwerken. Diplomarbeit Schule für Gestaltung Bern 1995.

OSMOND 1987

G. Osmond: A comparison of different adhesives and techniques for mending tears in paintings on canvas supports. Canberra College of Advanced education 1987.

PARKER 2005

James Parker: Testing adhesive formulations for use in the conservation of ethnographic artefacts. In: Conservation News 5, 2005, S. 24-27.

PLÖTZ 2002

Sandra Plötz: Klebstoffe für die Verklebung von Rissen in Polyesterweben. Seminararbeit Hochschule für Bildende Künste Dresden 2002.

PLÖTZ 2003

Sandra Plötz: Die Verklebung von Rissen in einem mit Wachs getränkten Gewebe. Theoretischer Teil der Diplomarbeit Hochschule für Bildende Künste Dresden 2003.

POLYCHEMISTRY <www.polychemistry.com> Polychemistry Innovations Inc. (Hrsg.): Aquazol®

<http://www.polychemistry.com/products_aquazol_hp.php>,
<http://www.polychemistry.com/products_aquazol.php> (16.01.2008),
<http://www.polychemistry.com/dl/PCI18_Aquazol.pdf> (16.01.2008).

POLYMERLATEX <www.polymerlatex.com>

PolymerLatex GmbH (Hrsg): Produktdatenblatt Plextol B500

<http://www.polymerlatex.de/cms/index.php?id=details_pdf&type=123&s_tblprodkt_ProdId=141> (10.03.2008),
Produktdatenblatt Plextol D498

<http://www.polymerlatex.de/cms/index.php?id=details_pdf&type=123&s_tblprodkt_ProdId=159> (10.03.2008),
Produktdatenblatt Plextol D540 <http://www.polymerlatex.de/cms/d_AZ_pdf.php?s_ProdId=130> (10.03.2008)

Produktdatenblatt Plextol XA 561

<http://www.polymerlatex.de/cms/index.php?id=details_pdf&type=123&s_tblprodkt_ProdId=820> (10.03.2008),
Produktdatenblatt Plextol M615

<http://www.polymerlatex.de/cms/index.php?id=details_pdf&type=123&s_tblprodkt_ProdId=713> (10.03.2008).

PRZYBYLO 2006

Maria Przybylo: Langzeit-Löslichkeit von Störleim. Tatsache oder Märchen? In: VDR Beiträge zur Erhaltung von Kunst- und Kulturgut, Heft 1, 2006, S. 117-123.

RAFT, RAFT 1973

Karen Raft, Adam Raft: Beva 371 ein neues Klebemittel für Restauratoren,. In: Maltechnik/Restauro 1, 1973, S. 31-39

REEDY, REEDY 1988

Terry J. Reedy, Chandra L. Reedy: Statistical analysis in art conservation research. Research in conservation 1. USA (keine genauere Ortsangabe) 1988.

ROUETTE 1995

Karl Rouette: Flachs-Langfaseraufbau. In: Lexikon für Textilveredelung, Bd. 1, Dülmen 1995, S. 652f.

ROUX 1993

Anne-Sophie Roux: Traitement de déchirures de supports de toile. Diplomarbeit École Supérieure des Arts appliqués Bern 1993.

SANDNER 1990

Ingo Sandner: The treatment of cracks in canvas paintings with synthetic adhesives-Procedures and possible combinations. In: ICOM Committee for Conservation 9th triennial meeting (Dresden 26 - 31 August 1990). Paris 1990, S. 133-138.

SANDNER et al. 1990

Ingo Sandner, Bernd Bünsche, Gisela Meier, Hans-Peter Schramm, Johannes Voss: Konservierung von Gemälden und Holzskulpturen. Berlin 1990.

SCHAIBLE 1987

Volker Schaible: Neue Überlegungen zur Feuchtigkeit am Leinwandbild. In: Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung Nr. 1, 1987, S. 75-94.

SCHWARZ 2000

Otto Schwarz: Kunststoffkunde. 6. überarbeitete Auflage, Würzburg 2000.

SOMMERMEYER 1998

Barbara Sommermeyer: Konsolidierung matter, pudriger Malschichten aus dem Bereich der modernen Kunst/Anwendung ultraschallvernebelter Konsolidierungsmittel. Diplomarbeit Akademie der Bildenden Künste Stuttgart 1998.

SPRINGOB 2001

Caroline Springob: Stärkekleister als Verdickungsmittel von Störleim zur Malschichtfestigung In: Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung 1, 2001, S. 111-132.

SWIDER, SMITH 2005

Joseph S. Swider, Martha Smith: Funori- Overview of a 300- year-old consolidant. In: AIC Journal Vol. 44, No.2, 2005, S. 117-126.

TIMAR-BALAZSY, EASTOP 1998

Agnes Timar-Balazsy, Dinah Eastop: Chemical principles of textile conservation. Oxford 1998.

TOST 2005

Kristina Tost: Versuche zum Dehnungsverhalten gealterter Leinwand am Beispiel einer künstlich gealterten, mittelschweren Flachsleinwand. Seminararbeit Hochschule für Bildende Künste Dresden 2005.

UHU <www.uhu.de>

UHU GmbH & Co. KG (Hrsg.): Produktinformation zu Uhu plus schnellfest

<http://www.uhu.de/produkte/test_prod_cons/produktansicht/index2.php?auswahlKategorie=9&artikel_id=92&sprache_id=1> (29.04.2008).

VITI, HAUDEK 1981

Erna Viti, Heinz Werner Haudek: Textile Fasern und Flächen. Bd. 1, Wien 1981.

VON HOFF 2006

Amelie von Hoff: Kriegsverloren & Wiedergewonnen. Die Restaurierung von Feuchtigkeitsschäden an einem Historiengemälde von J. Hübner mit dem Schwerpunkt der Ergänzung partieller Gewebeverluste des köpergewebten Bildträgers. Diplomarbeit Fachhochschule Köln 2006.

WAENTIG 2004

Friederike Waentig: Kunststoffe in der Kunst. Eine Studie unter konservatorischen Gesichtspunkten. Petersberg 2004.

WEDDINGEN 1979

Erasmus Weddingen: Zur Fragwürdigkeit des Doublierens. In: Mitteilungen DRV 1979, S. 30-34.

WESSEL 2000

Birgit Wessel: Baumwollgewebe als Bildträger. Diplomarbeit Fachhochschule Köln 2000.

WOLBERS et al. 1998

Richard C. Wolbers, Mary McGinn, Deborah Duerbeck: Poly(2-Ethyl-2-Oxazoline): A new conservation consolidant. In: Painted Wood: History and Conservation, Los Angeles 1998, S. 514-527.

WORCH 2006

Maria Theresia Worch: Kleben oder Kleben-lassen? Erfahrungen und Einsichten mit Klebekonsolidierungen historischer Textilien. In: VDR-Beiträge zur Erhaltung von Kunst- und Kulturgut, 1/2006, S. 15-33.

WÜLFERT 1999

Stefan Wülfert: Der Blick ins Bild- lichtmikroskopische Methoden zur Untersuchung von Bildaufbau, Fasern und Pigmenten. Ravensburg 1999.

WUNTSCHKE 1997

Sabine Wuntschek: Ein vernetztes Klebstoffsystem zur Rissverklebung. Zusatzthema der Diplomarbeit, Hochschule für Angew. Kunst Wien 1997.

YOUNG 2003

Christina Young: The mechanical requirements of tear mends. In: Alternatives to lining, Hrsg. von Mary Bustin und Tom Caley, London 2003, S. 55-58.

YOUNG, HIBBERD 1999

Christina R. Young, Roger D. Hibberd: Biaxial tensile testing of paintings on canvas. In: Studies in Conservation 44, 1999, S. 129-141.

ZUMBÜHL 2003

Stefan Zumbühl: Proteinische Leime- ein vertrauter Werkstoff? Aspekte zum feuchtephysikalischen Verhalten von Gelatine. In: Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung 17/2003, Heft 1, S. 95-103.

9.2 Abkürzungsverzeichnis

%	Prozent
°C	Grad Celsius
°F	Grad Fahrenheit
µm	Mikrometer
Abb.	Abbildung
AG	Aktiengesellschaft
BEVA	Bergers Ethylen-Vinyl-Acetat
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
CE	Celluloseether
cm	Zentimeter
CMC	Natrium-Carboxymethylcellulose
CMC	Natrium-Carboxy-Methyl-Cellulose
cN	Zentinewton (1cN = 0,01 Newton)
cST	Centistokes, Einheit der kinematischen Viskosität
d.h.	das heißt
DIN	Deutsche Industrie Norm
Dipl.	Diplom
Dr.	Doktor
DS	Degree of substitution (Substitutionsgrad)
EHEC	Ethylhydroxyethylcellulose
EN	Europäische Norm
et al.	et alii / et aliae (und andere)
etc.	et cetera
evtl.	eventuell
f	und folgende Seite
FH	Fachhochschule
FTIR	Fourier-Transfer-Infrarot-Reflektographie
g	Gramm
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
h	Stunde(n)
HC	Hemicellulosen
HEC	Hydroxyethylcellulose
HfAK	Hochschule für Angewandte Kunst
HPC	Hydroxypropylcellulose,
HPMC	Hydroxypropylmethylcellulose
Hrsg.	Herausgeber

HV	hochviskos
Ing.	Ingenieur
IR	Infrarot
MA	Methylacrylat
MC	Methylcellulose
MfK	Medium für Konsolidierung
MHEC	Methylhydroxyethylcellulose
min	Minute(n)
mol	Mol
mPa*s	Milli-Pascal-Sekunde, Einheit der Viskosität
N/m	Newton pro Meter
N/mm ²	Newton pro Quadratmillimeter
nBuMA	n-Butyl-Meth-Acrylat
nm	Nanometer
Nr.	Nummer
PA	Polyamid
PBMA	Polybutylmethacrylat
PEOX	Poly-2-ethyl-2-oxazolin
PETP	Polyethylenterephthalat
pH	negativer dekadischer Logarithmus der H ⁺ - Ionen- Konzentration
PMMA	Polymethylmethacrylat
Prof.	Professor
PS	Pektinsubstanz
PVAC	Polyvinylacetat
PVAI	Polyvinylalkohol
Rest.	Restaurator/ Restauratorin
rF	relative Feuchte
S.	Seite
s.	siehe
Tab.	Tabelle
Tg	Glasübergangspunkt
u.a.	unter anderem
usw.	und so weiter
UV	Ultraviolett
z.B.	zum Beispiel

9.3 Verzeichnis der Abbildungen, Diagramme und Tabellen

- Abb. 1: Aufbereitungsarten für Flachsfasern (erstellt von der Autorin).
 Abb. 2: Querschnitt der für die Versuche in dieser Arbeit verwendeten Leinenfadens (erstellt von der Autorin).
 Abb. 3: Die Benetzbarkeit eines Festkörpers durch ein Klebemittel (entnommen aus: KOCHENDÖRFER 2007, S. 13).
 Abb. 4: Mechanische und spezifische Adhäsion (entnommen aus: Chemievorlesung von Prof. Dr. Jägers, FH Köln).
 Abb. 5: Die Klebungen wurden mit folgenden Hilfswerkzeugen ausgeführt... (erstellt von der Autorin).
 Abb. 6: Klebevorgang bei flüssigen Klebstoffen (erstellt von der Autorin).
 Abb. 7: Prüfplatz der Zugmaschine mit direkter PC-Auswertung (erstellt von der Autorin).
 Abb. 8: Einspannvorrichtung mit eingespanntem Prüfling (erstellt von der Autorin).
 Abb. 9: Ausschnitt des computergestützten Klimaprotokolls der zyklischen Klimawechsel (erstellt von der Autorin).

- Diagramm 1: Höchstzugkraft der Klebungen im Vergleich (erstellt von der Autorin).
 Diagramm 2: Variationskoeffizienten (erstellt von der Autorin).
 Diagramm 3: Zug-Dehnungs Diagramm der Klebungen mit Plectol D360 (erstellt von der Autorin).
 Diagramm 4: Zug-Dehnungs-Diagramm der Klebungen mit Plectol D540 (erstellt von der Autorin).
 Diagramm 5: Zug-Dehnungs-Diagramm der Klebungen mit Polyamidpulver (erstellt von der Autorin).
 Diagramm 6: Zug-Dehnungs-Diagramm der Klebungen mit Störleim-Weizenstärkekleister (erstellt von der Autorin).
 Diagramm 7: Zug-Dehnungs-Diagramm der Klebungen mit Mowilith DMC2 (erstellt von der Autorin).
 Diagramm 8: Zug-Dehnungs-Diagramm der Klebungen mit Mowilith D50 95% (erstellt von der Autorin).
 Diagramm 9: Zug-Dehnungs-Diagramm der Klebungen mit Epoxidharz (erstellt von der Autorin).
 Diagramm 10: Höchstzugkraft der Störleim-Weizenstärkekleister-Klebungen im personenbezogenen Versuch (erstellt von der Autorin).
 Diagramm 11: Höchstzugkraft der Mowilith D50-Klebungen im personenbezogenen Versuch (erstellt von der Autorin).
 Diagramm 12: Höchstzugkraft der Polyamid-Klebungen im personenbezogenen Versuch (erstellt von der Autorin).
 Diagramm 13: Höchstzugkraft der Epoxidharz-Klebungen im personenbezogenen Versuch (erstellt von der Autorin).
 Diagramm 14: Höchstzugkraft im personenbezogenen Versuch (erstellt von der Autorin).
 Diagramm 15: Höchstzugkraft der Störleim-Weizenstärkekleister-Klebungen vor und nach der zyklischen Klimabelastung (erstellt von der Autorin).
 Diagramm 16: Höchstzugkraft der Mowilith D50-Klebungen vor und nach der zyklischen Klimabelastung (erstellt von der Autorin).
 Diagramm 17: Höchstzugkraft der Polyamid-Klebungen vor und nach der zyklischen Klimabelastung (erstellt von der Autorin).
 Diagramm 18: Höchstzugkraft der Epoxidharz-Klebungen vor und nach der zyklischen Klimabelastung (erstellt von der Autorin).
 Diagramm 19: Zug-Dehnungs-Diagramm der Klebungen mit Epoxidharz nach der zyklischen Klimabelastung (erstellt von der Autorin).
 Diagramm 20: Höchstzugkraft der Klebungen bei extremen Klimata (erstellt von der Autorin).
 Diagramm 21: Übertragbarkeit der Ergebnisse an Einzelfäden auf Klebungen in Gewebestrukturen (erstellt von der Autorin).
 Tabelle 1: Analyseergebnisse der Zusammensetzung von Flachsfasern, die aus einer einheitlichen Strohpartie hergestellt wurden (erstellt von der Autorin, Daten entn. aus: ROUETTE 1995, S. 651).
 Tabelle 2: Abkürzungen verschiedener Celluloseether (erstellt von der Autorin).
 Tabelle 3: Angaben des Herstellers Celanese Emulsions GmbH zu den Mowilithprodukten (erstellt von der Autorin).

- Tabelle 4: Angaben der Hersteller PolymerLatex GmbH und Lascaux AG zu Plectolprodukten (erstellt von der Autorin).
- Tabelle 5: Eigenschaften der Polyamidpulver (erstellt von der Autorin).
- Tabelle 6: Eigenschaften von bisher für die Rissverklebung verwendeten Epoxidharzen nach Angaben der Hersteller und DOWN 1984 (erstellt von der Autorin).
- Tabelle 7: Bisherige Forschungsergebnisse zu (Höchst-) Spannungen in Leinwandgemälden (erstellt von der Autorin).
- Tabelle 8: Übertragbarkeit der Ergebnisse an Einzelfäden auf Klebungen in Gewebestrukturen (erstellt von der Autorin).

9.4 Herstellernachweis / Bezugsadressen

Acrykleber 498HV	Lascaux Alois K. Diethelm AG, Zürichstrasse 42, CH-8306 Brüttisellen
Aquazol 500	Talas 20 West 20th Street, 5th Floor, New York, NY 10011
Leinenfaden LINEN LEA:20 raw Nm12, Nr. 115/2007	H.D. Textil Trade GmbH, Volksgartenstr. 85-89, 41065 Mönchengladbach
Mowilith D 50%, Chargen-Nr. 227116	Celanese Emulsions GmbH, D- 65926 Frankfurt am Main
Mowilith DHS S1, Chargen- Nr. 254769	Celanese Emulsions GmbH, D- 65926 Frankfurt am Main
Mowilith DMC2	Kremer-Pigmente Farbmühle, Hauptstr. 41, D-88317 Aichstetten, Artikel-Nr. 76582
Mowilith LD 167, Chargen- Nr. 180166	Celanese Emulsions GmbH, D- 65926 Frankfurt am Main
Paraloid B72	Kremer-Pigmente Farbmühle, Hauptstr. 41, D-88317 Aichstetten, Artikel-Nr. 67400
Plexigum PQ611	Kremer-Pigmente Farbmühle, Hauptstr. 41, D-88317 Aichstetten, Artikel-Nr. 67380
Plextol B500	Kremer-Pigmente Farbmühle, Hauptstr. 41, D-88317 Aichstetten, Artikel-Nr. 75600
Plextol D360	Deffner&Johann, Mühlacker Straße 13, D-97520 Röthlein, Best.-Nr. 2558100
Plextol D498	Kremer-Pigmente Farbmühle, Hauptstr. 41, D-88317 Aichstetten, Artikel-Nr. 76000
Plextol D540 Chargen-Nr. 10- 510-2-5	Röhm GmbH, Kirschenallee, D64293 Darmstadt, heutiger Hersteller: Polymer Latex
Polyamid- Textil- Schweißpulver 5065	Lascaux Alois K. Diethelm AG, Zürichstrasse 42, CH-8306 Brüttisellen
Reisstärke	Kremer-Pigmente Farbmühle, Hauptstr. 41, D-88317 Aichstetten, Artikel-Nr. 63440
Störleim Salianski Hausenblase	Kremer-Pigmente Farbmühle, Hauptstr. 41, D-88317 Aichstetten, Artikel-Nr. 63110
Textilschweißpulver	Kremer-Pigmente Farbmühle, Hauptstr. 41, D-88317 Aichstetten, Artikel-Nr. 97800
Tylose MH 1000	Deffner&Johann, Mühlacker Straße 13, D-97520 Röthlein, Best.Nr.: 2438 000
Uhu plus schnellfest	UHU GmbH & Co. KG, Herrmannstrasse 7, D - 77815 Bühl, Art.-Nr. 45700

Die folgenden Kapitel des Anhangs sind der Diplomarbeit als CD beigelegt und wurden in die vorliegende Arbeit nicht mit aufgenommen.

- 9.5 Schlichten und Gleichmäßigkeit von Leinenfäden
- 9.6 Klebprotokoll
- 9.7 Einstellungen an der Zugmaschine
- 9.8 Zugprüfungsprotokolle
- 9.9 Fragebögen zum personenbezogenen Versuch